

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Cálculo y diseño de una batería mecánica**

**AUTOR:** *Fabio Pacheco Tognetti*

**TUTOR:** *Juan Carlos García Prada*

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>4</b>
1.1	Objetivos .....	5
1.2	El almacenamiento de energía en la actualidad .....	6
<b>2</b>	<b>Aplicaciones actuales de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía.....</b>	<b>8</b>
2.1	Sistemas de almacenamiento de energía .....	9
2.1.1	Almacenamiento electroquímico .....	9
2.1.2	Almacenamiento por medio de aire comprimido .....	10
2.1.3	Almacenamiento electromagnético .....	12
2.1.4	Almacenamiento en células de combustible .....	13
2.1.5	Almacenamiento potencial .....	14
2.1.6	Almacenamiento en supercondensadores .....	15
2.1.7	Almacenamiento de energía en volantes de inercia electromagnéticos.....	17
<b>3</b>	<b>Introducción al volante de inercia electromagnético .....</b>	<b>19</b>
3.1	El volante de inercia electromagnético o flywheel .....	19
3.1.1	Componentes del volante de inercia electromagnético .....	20
3.1.2	Rotor .....	21
3.1.3	Motor-generador .....	22
3.1.4	Rodamientos .....	23
3.1.5	Bomba de vacío .....	24
3.1.6	Carcasa protectora.....	24
3.2	Historia, antecedentes y evolución en los usos del volante de inercia. ....	24
<b>4</b>	<b>Tipos de Motores DC según su uso y aplicación .....</b>	<b>29</b>
4.1	Construcción y operación de un motor de CC con escobillas.....	29
4.2	Control del motor CC con escobillas .....	31
4.3	Resumen del motor de CC con escobillas .....	31
4.4	Construcción y operación de los motores de CC sin escobilla .....	31
4.5	Resumen del BLDC .....	32
4.6	Soluciones de control de motores de CC disponibles.....	33
<b>5</b>	<b>Motores DC sin escobillas (BLDC) .....</b>	<b>34</b>
5.1	Sistema de control en un motor BLDC.....	34
5.2	Métodos de conmutación de motores sin escobillas.....	38
5.2.1	Conmutación trapezoidal o six steps.....	38
5.2.2	Conmutación sinusoidal.....	39
5.2.3	Control vectorial o Field Oriented Control.....	40
<b>6</b>	<b>Presentación del prototipo .....</b>	<b>41</b>
6.1	Motor .....	41
6.2	Volante de Inercia .....	42
6.3	Controlador .....	44
6.3.1	Variadores Lineales (BEC) .....	45
6.3.2	Variadores BEC cambiantes.....	45
6.3.3	Control a través de un ESC .....	45
6.3.4	Elección correcta .....	46
6.4	Arduino Mega ADK .....	46
6.4.1	Aspectos .....	46
6.4.2	Características técnicas .....	47
6.4.3	Programación .....	48
6.4.4	Automatic (Software) Reset .....	48
6.4.5	Protección de sobreintensidad USB.....	49

6.4.6	Compatibilidad.....	49
6.4.7	Código Arduino para el control del BLDC.....	49
6.4.8	Lectura digital de la evolución voltaje-batería con Matlab.....	51
6.5	Arduino ATmega2560 .....	52
6.6	Batería LiPo .....	53
6.6.1	Aspectos generales.....	53
6.6.2	Voltaje o clasificación “S” .....	53
6.6.3	Clasificación por capacidad .....	54
6.6.4	Tasa de descarga o “C” .....	54
6.6.5	Voltaje y corriente máximo de carga.....	55
<b>7</b>	<b>Metodología de pruebas.....</b>	<b>56</b>
7.1	Obtención de los parámetros del motor.....	56
7.1.1	Pruebas y respuesta del motor BLDC.....	57
7.1.2	Tasa de descarga de la batería LiPo .....	58
7.1.3	Esquema funcional .....	59
<b>8</b>	<b>Configuraciones de test.....</b>	<b>62</b>
8.1	Escenario sin realimentación .....	62
8.2	Principio de carga y descarga.....	63
8.3	Escenario con realimentación .....	64
<b>9</b>	<b>Planificación y Viabilidad.....</b>	<b>70</b>
9.1	Presupuesto del prototipo .....	71
9.2	Planificación para la realización del proyecto .....	73
<b>10</b>	<b>Resumen y conclusiones.....</b>	<b>75</b>
10.1	Resumen y conclusiones .....	75
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>78</b>
<b>12</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>79</b>

## 1 Introducción

El almacenamiento de la energía se transformó en un factor dominante en el desarrollo económico con la introducción generalizada de la electricidad y químicos combustibles refinados, como el queroseno, la gasolina o el gas natural a principios del siglo XIX. A diferencia de otros métodos comunes de almacenamiento, la electricidad producida debe emplearse en el momento de su generación, puesto que no somos capaces de hacerlo sin ningún tipo de pérdidas adicionales y debemos almacenarla en dispositivos de menor escala. Para transmitir la electricidad debemos constatar de un circuito cerrado el cual se empleará para cualquier propósito práctico, y no podrá ser acumulada como energía eléctrica. Esto significa que los cambios continuos en las demandas no podrán tener cabida, sin corte de los suministros, ya sea por apagones, o disponer de una técnica de almacenamiento fiable, algo imposible en la actualidad.

Se espera que el almacenamiento de energía en el hogar tenga cada vez más peso, puesto que hay un importante crecimiento procedente de las energías renovables y a su vez se produce un aumento en el consumo de energía. Un hogar equipado con un sistema fotovoltaico puede asegurar hasta un 40% de sus necesidades energéticas. Sin embargo, para poder alcanzar una autosuficiencia más elevada, es necesario un sistema de almacenamiento de la energía, debido a las diferencias entre el consumo de energía y la energía producida.

Los combustibles fósiles se han convertido en la forma dominante de almacenamiento de energía, tanto en la generación eléctrica como en el transporte de la misma. Los combustibles petroquímicos se procesan del carbón, el gasóleo, la gasolina, el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP), el propano, el butano, el etanol, el biodiesel y el hidrogeno. El gran problema es que todos estos productos químicos son fácilmente transformables en energía mecánica, que, a su vez, se transforma a través de generadores eléctricos en energía eléctrica.

Debido a la creciente concienciación medioambiental, la sociedad actual demanda cada vez más máquinas y útiles que hagan nuestras vidas más eficientes y seguras, siendo las mejores soluciones al respecto las que causen menos impacto medioambiental, ya que serán las más aceptadas por los consumidores. En las últimas décadas el almacenamiento electroquímico ha crecido de manera exponencial, siendo utilizado tanto en grandes centrales, en hogares y en transporte (ya sea logístico privado o público) hasta en dispositivos de muy baja potencia. El almacenamiento químico no es nocivo para el medioambiente de manera instantánea, es decir su utilización no es contaminante. El problema del almacenamiento químico no solo reside en su compuesto, también reside en el necesario control exhaustivo y el apropiado almacenaje que requiere a largo plazo ya que puede ser perjudicial para el medioambiente; sin tener en cuenta su vida útil relativamente corta y por lo tanto el requerimiento constante de mantenimiento en algunos de sus tipos.

El almacenamiento de energía es uno de los métodos con los que se puede obtener un gran ahorro, ya que permite reutilizar la energía, siendo el almacenamiento



cinético uno de los métodos que actualmente están sufriendo un mayor desarrollo. El empleo del volante de inercia electromagnético como técnica para almacenar la energía se erige como una de las técnicas más prácticas y sencillas para aumentar el ahorro y la eficiencia energética. Este tipo de almacenamiento no conlleva ningún daño al medioambiente ni a corto ni a largo plazo puesto que consta de materiales que no contaminan ni producen CO<sub>2</sub>. El empleo de esta tecnología podría ser una solución total o parcial a la problemática que supone el almacenamiento de la energía. No obstante, el almacenamiento en elementos rotativos conlleva un conjunto de fuerzas y momentos que pueden ser perjudiciales o beneficiosos dependiendo de la aplicación y la capacidad que se tenga de los mismos.

En este proyecto se describirá el diseño y cálculo de un generador de momento cinético llevado a campo, para testearlo de manera real y probar su eficiencia frente a los distintos tipos de almacenamiento de la energía. Consistirá por lo tanto en crear, desarrollar y mejorar un elemento mecánico que sea capaz de generar, conservar y reaprovechar su energía. Junto al generador se empleará un sistema de control para evaluar su eficiencia cuyo objetivo también será su control exhaustivo y mediciones en campo de pruebas reales.

## 1.1 Objetivos

A partir del acople entre un pequeño motor eléctrico de aeromodelismo y un volante de inercia obtenido del despiece de un disco duro se quiere demostrar el funcionamiento de una batería mecánica. Con ello, seremos capaces de almacenar una cantidad de energía que será cuantificable a través de una serie de ensayos en campo.

El objetivo del proyecto se centra en el estudio y diseño de una batería mecánica, que sea capaz de cargarse mediante una fuente externa (por medio de una batería en este caso, pero podría tratarse de una fuente de alimentación) y a su vez, capaz de almacenar una cuantía de energía mecánica (gracias al volante de inercia) para después restituirla en forma de energía eléctrica (a través del motor/generador eléctrico). Se busca estudiar a través de una batería electroquímica LiPo (Litio y polímero) los márgenes y potenciales reales de generación de energía que es capaz de restituir el prototipo. Con lo cual utilizaremos la batería LiPo como sensor y medidor de tensión.

Mediante una placa Arduino, controlaremos todo el sistema de forma que podremos ver, gracias a la ayuda de Matlab, tanto la cantidad de energía que es capaz de desplazar el volante como observar su comportamiento frente al tiempo. Queremos que el sistema trabaje como generador para cargar un dispositivo (batería LiPo en este caso), o que trabaje como motor para elevar su energía cinética y así aumentar su capacidad de almacenamiento.

Una vez diseñado el prototipo y llevado a campo para someterse a las pruebas correspondientes que veremos más adelante, se pasó a su configuración por medio de Arduino. Se utilizó un código que permitiría al sistema funcionar de manera

independiente y otro que permitiría la inversión de polaridad mediante pulsos para añadir al motor el factor de bidireccionalidad y así hacerlo funcionar tanto como motor como generador.

Se compararán dos configuraciones del sistema para cuantificar el aporte potencial del conjunto generador-volante de inercia. Por un lado se comprobará la descarga de la batería simplemente alimentando el motor. Después se realizarán las mismas pruebas pero añadiendo el factor bidireccional, es decir con configuración generador-motor.

La batería mecánica portátil podría sustituir las baterías químicas convencionales de hoy en día que son perjudiciales para el medioambiente. Con este prototipo me gustaría demostrar el potencial de las baterías mecánicas, puesto que es una tecnología que existe desde hace siglos, pero siempre se ha mantenido a la sombra de las baterías químicas dado que por una serie de intereses y por un escaso conocimiento de aleaciones que pudieran soportar las fuerzas provocadas por los volantes de inercia, no se han desarrollado ni expandido tanto en la última década como el almacenamiento químico.

## 1.2 El almacenamiento de energía en la actualidad

La era de la industria marcó un antes y un después en la sociedad, lo que ha hecho que el hombre utilice las reservas naturales de energía como fuente primaria de una manera irresponsable, haciendo uso de ellas como fuentes inagotables e infinitas. Actualmente gracias a los avances tecnológicos, se sabe que estas fuentes de energía se pueden agotar y solo es cuestión de tiempo su agotamiento. Este es el motivo por el que un uso responsable de estos recursos naturales es un objetivo prioritario en una sociedad como en la que vivimos. Por eso actualizar los procesos industriales elevando su rendimiento total no es suficiente, sino que es necesario gestionar la energía de una manera más eficiente posible.

Actualmente la tecnología necesaria para llevar a cabo una buena gestión de la energía existe, con lo cual buscar el método que se atenga mejor a nuestras necesidades es fundamental para un desarrollo eficiente. El almacenamiento juega un papel muy importante en este aspecto, ya que bajo la filosofía del almacenamiento se busca una optimización de los procesos energéticos. De esta forma la energía excedente de un proceso deja de ser un deshecho industrial, y pasa a convertirse en energía reciclable.

Así procesos como el frenado de un vehículo cuya energía actualmente se disipa en forma de calor siendo actualmente desechada, podríamos reutilizar esta energía reciclándola y haciendo de esta energía reutilizable. Al igual pasa con el calor residual procedente de los procesos termodinámicos que podría ser almacenado y reutilizado en forma de energía eléctrica.

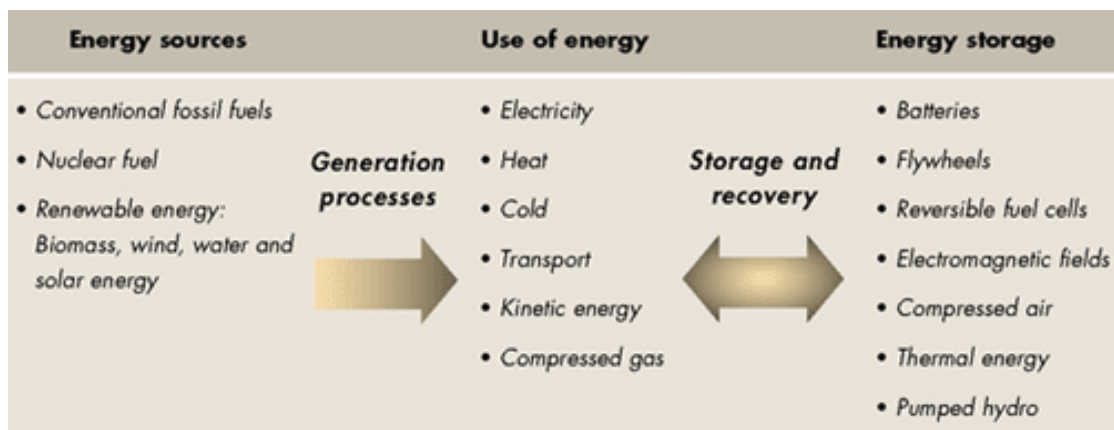
El almacenamiento de energía tiene varios campos de aplicación donde puede ser económica y energéticamente rentable. Como podemos ver el almacenamiento de energía eléctrica y energía térmica producida ocasionalmente en periodos de

tiempo de demanda baja y de bajo coste, así como la energía generada por fuentes intermitentes tales como la energía solar o eólica pueden ser almacenadas para posteriormente ser utilizadas en periodos de alta demanda y elevado coste o cuando no hay capacidad de generación convencional disponible.

Esto significa que gracias al almacenamiento podemos transformar una energía de bajo coste o que pudiera ser nociva para la red eléctrica, en una energía reutilizable con un coste más elevado y sobretodo poder utilizarla cuando sea necesario según las fuentes convencionales disponibles.

El almacenamiento de energía además es un requisito previo para usar energía renovable en posiciones remotas, ya que de esta forma podemos pensar en un sistema de generación distribuido. Así juega un papel importante para la obtención de una fuente de energía sostenible con los estándares de servicios técnicos que estamos acostumbrados a utilizar.

En la siguiente tabla podemos observar las principales fuentes de energía primaria, su transformación y los diferentes modos de almacenaje.



"Diagram of energy sources, use of energy and energy storage"

Figura 1: Tabla de distintas transformaciones de energía y distintos almacenajes

## 2 Aplicaciones actuales de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía

Tenemos una gran variación en la tecnología actual de almacenamiento. Dependerá de múltiples factores, como, la energía almacenada, potencia necesaria, volumen disponible, rapidez de respuesta, etc. La decisión por utilizar un sistema de almacenamiento diferente, depende de los requisitos del uso y del coste de las soluciones alternativas. Así, los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser muy recomendables por sus características especiales para determinadas situaciones:

- Los sistemas de almacenamiento de energía se pueden sustituir generalmente por la generación convencional. Sin embargo, esto puede conducir a un uso ineficiente de combustibles fósiles y a una inversión excesiva en generadores de alta potencia y tiempo de respuesta rápida.
- Las centrales eléctricas, y los sistemas de calefacción, tienen diversas características de funcionamiento en lo que concierne a su tiempo de reacción a la demanda que cambia, sus tiempos para empezar a subir o bajar carga y sus puntos más eficientes de operación pueden dar lugar a una gestión no eficiente de la energía disponible.
- Los periodos de generación de energía por medio de fuentes renovables, no siempre se pueden emparejar con los periodos de demanda. Por esto, los sistemas de almacenamiento deberían ser una parte integral de cualquier sistema de energía renovable.
- El almacenamiento de energía debe requerirse por razones económicas cuando la generación por combustibles fósiles se utiliza para cubrir periodos de demanda baja puesto que es más barato que el uso de un generador convencional impulsado por una turbina o un motor térmico.
- El exceso de electricidad siempre se puede almacenar en forma de calor que es mucho más barato, y durante mucho tiempo. Sin embargo, el valor de la energía térmica es mucho más bajo que el valor de la electricidad con lo cual se busca siempre poder almacenar este excedente.
- Un punto a tener en cuenta siempre es la estabilidad del sistema eléctrico y la calidad de la tensión en los nudos, será considerablemente más alta cuando se utilice un sistema de almacenamiento de energía que pueda amortiguar los excedentes y los armónicos de forma que pueda restituirla con una mejor calidad y cuando sea necesario en los picos de demanda más alta.
- Podemos ver que en los sistemas térmicos solares para la calefacción es necesario también almacenar energía porque la generación del calor depende de la radiación solar que normalmente suele estar desacoplada de los periodos de demanda.

## 2.1 Sistemas de almacenamiento de energía

Actualmente existen varios procesos para poder llevar a cabo el almacenamiento de energía de una manera eficaz. Hay diversas tecnologías coexisten actualmente y por sus características las hacen atractivas para diversos usos.

Desde un punto de vista del usuario hay criterios técnicos y comerciales para seleccionar la tecnología más conveniente. Sólo nos centraremos en los métodos de almacenamiento de energía que permiten obtener energía de alta calidad, como es el caso de la energía eléctrica, dejando en un segundo plano los sistemas que permiten almacenar energía de baja calidad como la energía térmica. Los sistemas de almacenamiento de energía más destacables son:

- Almacenamiento electroquímico
- Aire comprimido
- Bombeo hidráulico
- Campos Electromagnéticos
- Células reversibles del combustible
- Supercapacitor
- Volantes de inercia

El almacenamiento de energía puede mejorar la eficacia y la fiabilidad de la red eléctrica, reduciendo los requisitos de uso de reservas para poder resolver demandas de energía máxima, aumentar la eficiencia de los procesos de generación en horas de mínima demanda y permitir el mayor uso de las tecnologías intermitentes e indeterminadas como son las energías renovables.

Las tecnologías anteriormente mencionadas se pueden clasificar en función de la energía específica almacenada, es decir, de la energía por unidad de masa, en función de la potencia específica, es decir, de la energía capaz de suministrar por unidad de tiempo y por unidad de masa.

### 2.1.1 Almacenamiento electroquímico

Las baterías o los acumuladores recargables son la forma más vieja de almacenamiento de la electricidad usada extensamente. Las baterías almacenan energía eléctrica en una forma química. Su funcionamiento se liga de una manera compleja a los materiales usados, a los procesos de fabricación y a las condiciones de funcionamiento. Por lo tanto, el progreso en tecnología de la batería es lento y la transferencia de los resultados del laboratorio en usos comerciales es a veces aventurada.

Las baterías de níquel-metal-hidruro de litio (NiMH) son las únicas nuevas tecnologías de la batería que han alcanzado la penetración en el mercado de manera significativa en la década pasada. Las baterías pueden responder a los cambios en demanda de la energía dentro de microsegundos. Solamente los supercondensadores igualan tal tiempo de reacción. Las baterías tienen pérdidas en espera muy bajas y pueden generalmente tener alto rendimiento energético, dependiendo del uso y de los detalles de la operación.

La mayoría de las baterías contienen los materiales tóxicos, por lo tanto el impacto ecológico de la disposición incontrolada de baterías debe ser siempre considerado. Otro aspecto importante a tener en cuenta es su limitada potencia de salida, la cual limita su utilización para aplicaciones en donde la demanda de potencia es pequeña, del orden de decenas de vatios.

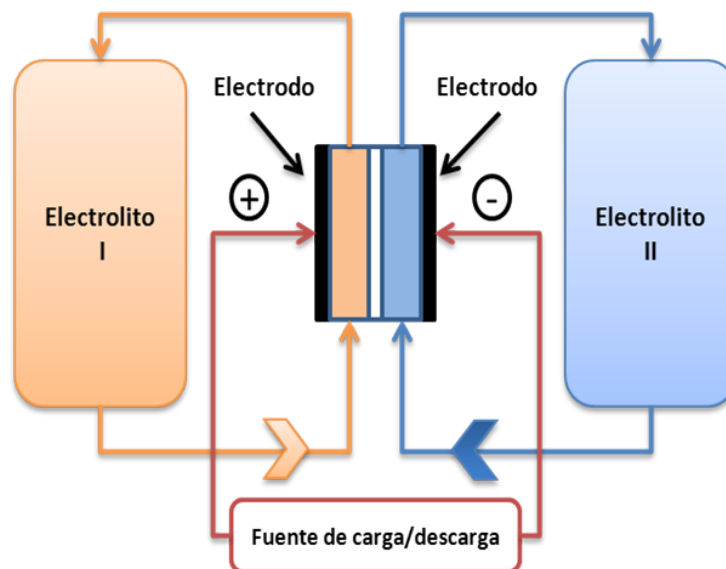


Figura 2: Muestra el Esquema básico de una batería *electroquímica*

### 2.1.2 Almacenamiento por medio de aire comprimido

El uso del aire comprimido y su capacidad para transmitir energía en forma de presión tiene siglos de historia. Su aprovechamiento a gran escala se remonta a la revolución industrial con la introducción de la neumática en la maquinaria de fábricas y centros de producción.

Poco después, en el siglo XIX, se desarrollan grandes redes de distribución de aire comprimido en ciudades como París, Birmingham, Dresden o Buenos Aires. Los sistemas evolucionan con rapidez alcanzando un tamaño más que considerable en los últimos compases del siglo: con hasta 2.2 MW de energía fluyendo por la red de París hacia el corazón de la industria y las pequeñas empresas.

Habría que esperar casi un siglo para que se desarrollase el concepto de producción eléctrica a través de almacenar aire comprimido. La idea es, como todas las grandes, sencilla: almacenar aire comprimido cuando “sobra” energía y extraerlo para producir energía cuando es necesaria. Después de años de investigación y desarrollo de la tecnología necesaria, vio la luz la primera planta de generación eléctrica a partir del almacenamiento de aire comprimido, en Alemania a finales de los años ochenta.

De forma más técnica, la idea es la siguiente: aprovechando los valles de demanda eléctrica, desviamos la producción sobrante, a muy bajo coste en esas horas, a nuestra central de compresión de aire y lo introducimos en una caverna subterránea especialmente construida para este propósito. Cuando la caverna alcanza su capacidad máxima o la demanda vuelve a crecer, cambiamos el sentido del flujo: extraemos el aire comprimido y lo utilizamos para producir energía eléctrica.

Cuando profundizamos en los procesos que componen este ciclo, normalmente diario, encontramos varias dificultades técnicas que nos alejan del rendimiento ideal y nos plantean retos a los ingenieros. Entre ellos, el más importante, es la termodinámica del ciclo: al comprimir el gas, éste se calienta, mientras que al expandirlo, se enfría considerablemente. Además hay que tener presente que para extraer trabajo de la expansión es necesario aportarle calor.

Hay varias soluciones a estas dificultades técnicas que componen los diferentes caminos de investigación abiertos en la actualidad. Se plantean sales y otros sólidos para extraer el calor al aire en la compresión y devolvérselo en la expansión, o el empleo de gas natural en la expansión, distintos métodos de compresión y expansión, incluso el empleo de metales líquidos en intercambiadores de calor.

Sin embargo, algunos de estos caminos rompen el carácter sostenible y renovable de este método de almacenamiento energético (como el uso de gas natural, que aun así, resulta ser menor de un tercio del necesario en una central de ciclo combinado). Por ello, se investiga en el empleo de mecanismos de almacenamiento térmico (como las soluciones salinas de las centrales de concentración solar o la reutilización de residuos de la construcción) para evitar el uso de combustibles fósiles en el ciclo de expansión.

El objetivo final de estas investigaciones es la implementación de un sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido (Compressed Air Energy Storage) en combinación con parques eólicos para incrementar la eficiencia de estas instalaciones aprovechando su producción nocturna.

En la actualidad, debido a la legislación energética vigente, la producción eólica nocturna (que es mayor que la diurna, al existir más viento a esas horas) se tira debido a la caída de demanda y la entrada prioritaria de otras fuentes de energía que la cubren. Para evitar este derroche que disminuye drásticamente el rendimiento económico de estas instalaciones, el almacenamiento energético surge como única alternativa real, siendo el CAES uno de los más serios pretendientes para materializar esa alternativa.

A continuación, se muestra un esquema modelo de cómo podría ser una central de almacenamiento de energía por aire comprimido en el que podemos ver como el aire es introducido o extraído de las cavernas base que se utilizan en esta metodología.

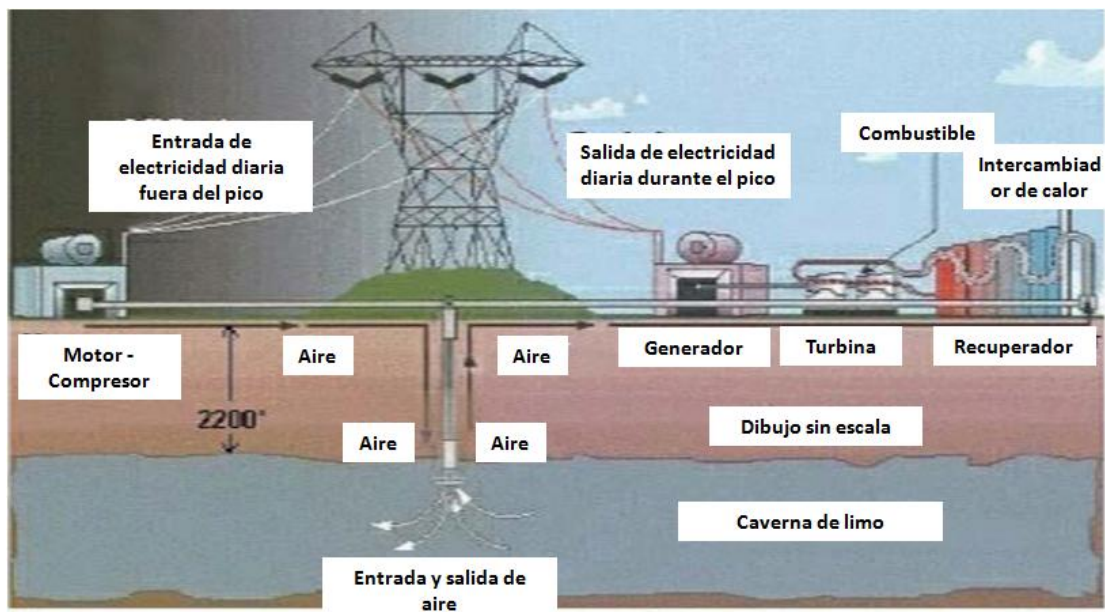


Figura 3: Ejemplo de una central con uso del almacenamiento en vacío

### 2.1.3 Almacenamiento electromagnético

En un sistema magnético de almacenamiento de energía de Superconductividad (SMES), la energía se almacena dentro de un imán que sea capaz de lanzar megavatios de energía dentro de una fracción de un ciclo para sustituir una pérdida repentina de energía en la línea.

La manera de trabajar es muy sencilla. En modo espera la corriente circula continuamente por la bobina superconductora para mantener el campo magnético activo, a través del interruptor normalmente cerrado del regulador de tensión y de la fuente de alimentación. La fuente de alimentación proporciona una carga pequeña para sustituir la energía perdida en las piezas no superconductoras del circuito.

Cuando se detecta un hueco de tensión, el regulador dirige energía activa y reactiva del inversor a la carga, en el plazo de dos milisegundos. Esta transferencia sistemática de la energía del imán a la carga mantiene al sistema en un punto de funcionamiento óptimo.

En la siguiente figura se muestra un esquema típico para un sistema de almacenamiento de energía en campos magnéticos.



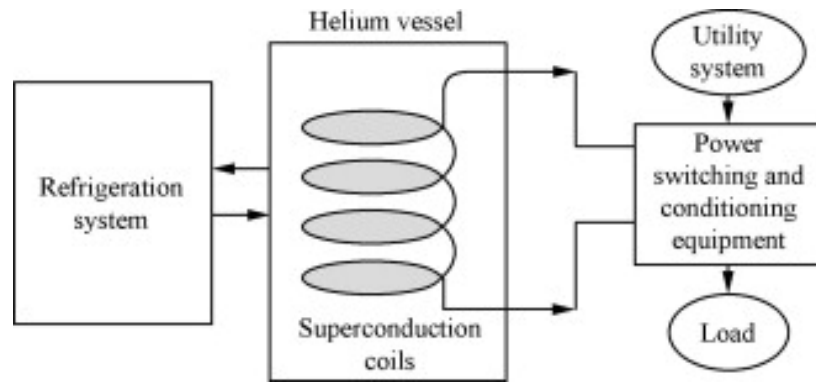


Figura 4: Esquema de un sistema de almacenamiento de energía por campos magnéticos.

Las recargas de los SMES se realizan en plazos de tiempo muy cortos del orden de minutos, lo que permite tener el sistema operativo en un breve periodo de tiempo, pudiendo repetir millares de veces la secuencia de carga/descarga sin ninguna degradación del imán. El tiempo de la recarga se puede acelerar para resolver requisitos específicos, dependiendo de la capacidad del sistema.

Los sistemas de los SMES utilizan el helio líquido para guardar la bobina de niobium-titanio en 4.2 (K), la temperatura requerida para que su material llegue a ser superconductor. Así en estado superconductor, el material conductor que compone el imán no tiene prácticamente ninguna resistencia eléctrica, esto permite a la bobina llevar corrientes grandes con pérdidas muy pequeñas por períodos de tiempo largos.

Aunque tecnológicamente parece una buena solución, en la actualidad parece una línea de trabajo prácticamente abandonada para aplicaciones industriales.

#### 2.1.4 Almacenamiento en células de combustible

Las células de combustible se basan en una tecnología bastante compleja. Se combina el hidrógeno de un tanque de almacenamiento y el oxígeno del aire para obtener agua y una corriente eléctrica de un proceso electroquímico.

La reacción electroquímica en sí mismo es reversible. La capacidad de la energía de las células del combustible es determinada por el tamaño de los tanques de almacenamiento, por los materiales activos, y la energía por área de los electrodos y del diseño del reactor.

Las pérdidas en espera son bajas porque los materiales activos se mantienen físicamente separados. Son sistemas que usan el agua como materia prima para obtener hidrógeno y oxígeno de una manera ecológica. Su rendimiento energético es más alto que los de las células reversibles de combustible, pero aún tienen un rendimiento energético menor que la mayoría de las baterías convencionales.

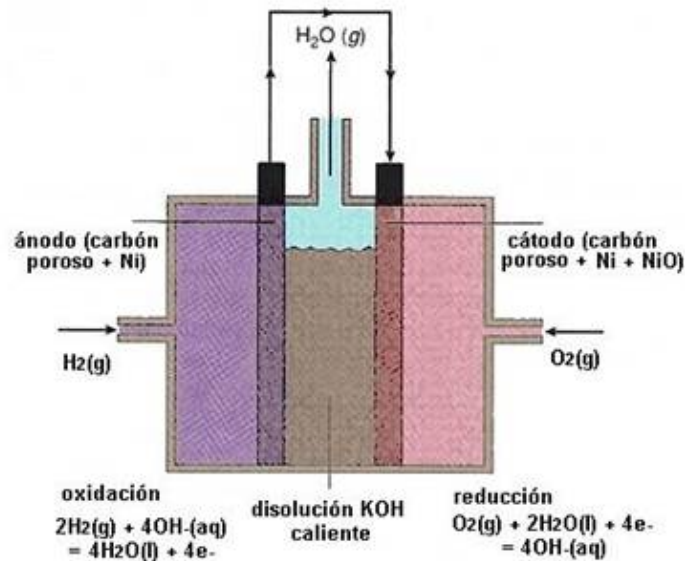


Figura 5. Esquema típico de una pila de hidrógeno

### 2.1.5 Almacenamiento potencial

Las centrales hidroeléctricas convierten la energía cinética contenida en una corriente de agua en electricidad. La cantidad de energía eléctrica generada es proporcional al volumen de flujo de agua y la altura del salto de agua (la altura desde las turbinas en la central eléctrica a la superficie del agua) creada por la presa. Cuanto mayor es el flujo y la altura, más energía eléctrica será producida.

Una planta hidroeléctrica típica incluye una presa, conductos forzados, una turbina y una subestación de eléctrica. El proceso de generación eléctrica es muy sencillo. La presa almacena el agua a una cierta altura, creando así un almacenamiento de energía, los conductos forzados llevan el agua del embalse a las turbinas, el agua rota las turbinas, que a su vez mueven los generadores eléctricos produciendo así energía eléctrica.

La electricidad entonces se transmite a una subestación donde los transformadores aumentan tensión para permitir el transporte a los hogares, negocios y fábricas. En la siguiente figura se muestra el esquema típico de una central hidroeléctrica.

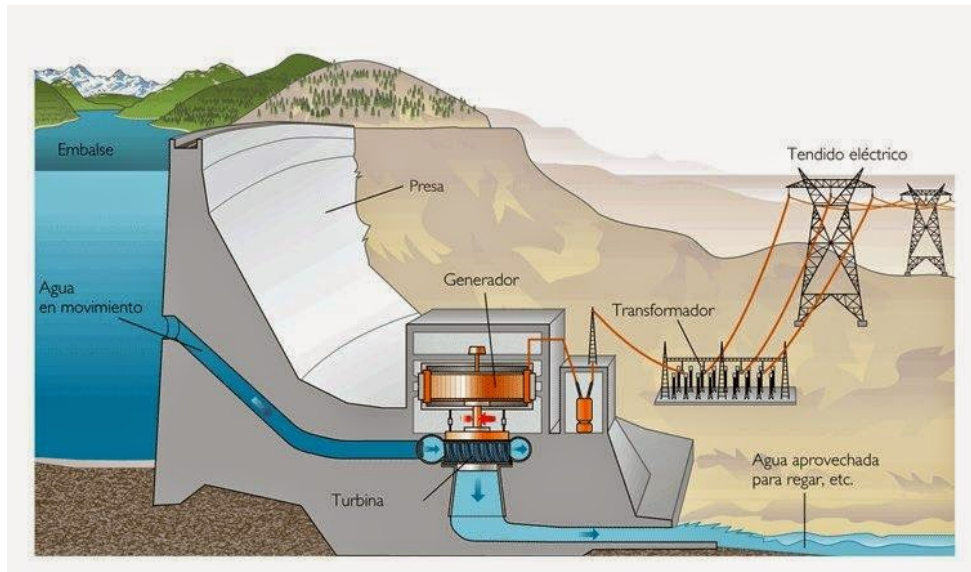


Figura 6. Esquema típico de una central hidráulica de bombeo

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en centrales de bombeo de agua, son los primeros sistemas que se utilizaron a gran escala para almacenar energía. Estos sistemas permiten almacenar grandes cantidades de energía y operar con potencias elevadas con un rendimiento relativamente alto (75%).

Es un método sencillo, se trata de generar electricidad con energía hidroeléctrica, durante las horas de consumo máximo en la red usando el agua que se ha bombeado en un embalse elevado durante las horas de consumo bajo.

#### 2.1.6 Almacenamiento en supercondensadores

Los ultracondensadores son dispositivos de almacenamiento de energía que utilizan electrólitos y se configuran en módulos para resolver los requerimientos de energía, potencia, y de tensión para una amplia gama de usos. El método por el cual los supercondensadores almacenan energía es electrostático.

Actualmente, los supercondensadores son más costosos (por unidad de la energía) que las baterías. Los supercondensadores son similares a los condensadores, en el que la energía está almacenada electrostáticamente entre dos electrodos separados por un electrolito. Estos pueden soportar centenares de miles de ciclos de carga/descarga sin degradarse, proporcionando descargas rápidas de energía.

Un supercondensador, también conocido como condensador de doble capa, polariza una solución electrolítica para almacenar energía de forma electrostática. Aunque es un dispositivo electroquímico, no se implica ninguna reacción química en su mecanismo de almacenamiento de energía. Este mecanismo es altamente reversible, y permite que el supercondensador sea cargado y descargado centenares de miles de veces.

Un supercondensador se puede ver como dos placas porosas no reactivas, o colectores, suspendidos dentro de un electrolito, con una diferencia de potencial

aplicado a través de los electrodos. En una célula individual del supercondensador, el potencial aplicado en el electrodo positivo atrae los iones negativos en el electrolito, mientras que el potencial en el electrodo negativo atrae los iones positivos. Un separador dieléctrico entre los dos electrodos evita que la carga se mueva entre ellos.

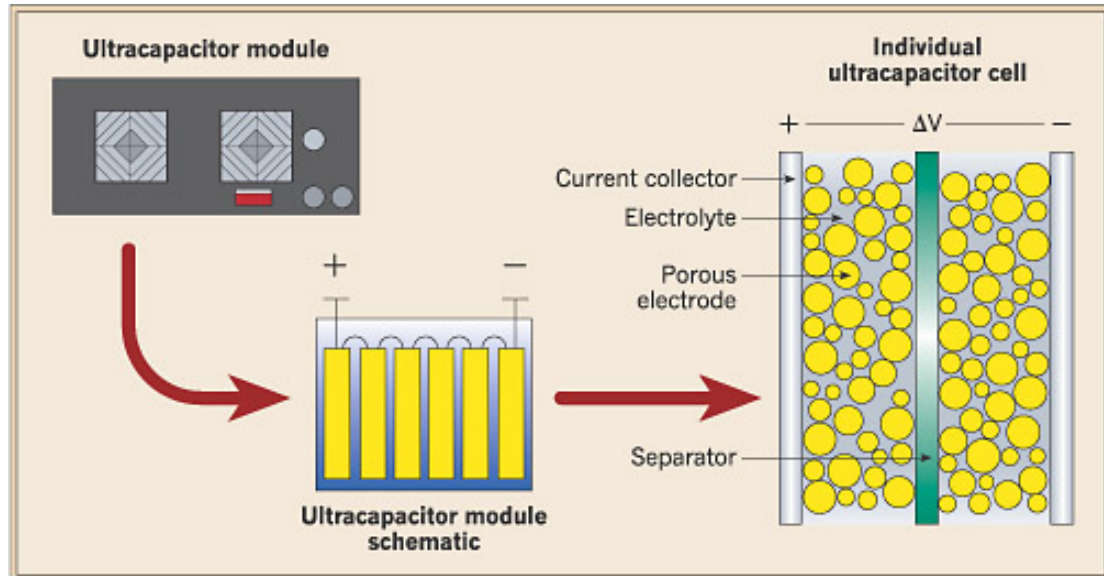


Figura 7: Esquema de un supercondensador

Una vez que se carga el supercondensador y se almacena la energía, una carga eléctrica puede utilizar esta energía. La cantidad de energía almacenada es muy grande comparada a un condensador estándar debido al enorme área superficial creada por los electrodos porosos y la pequeña separación entre electrodos por el separador dieléctrico.

Puesto que los índices de la carga y de descarga son determinados solamente por sus características físicas, el supercondensador puede lanzar energía mucho más rápidamente (potencia) que una batería que depende de reacciones químicas lentas.

Son muchos los usos en los que los supercondensadores pueden ser utilizados, Se pueden utilizar para proporcionar pulsos cortos de energía o como ayuda en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).

Los supercondensador pueden ser dispositivos para proporcionar un suplemento de energía primaria durante la aceleración y ascensión de rampas, así como para la recuperación de la energía de frenado en sistemas de transporte. Usar un supercondensador conjuntamente con una batería combina el funcionamiento de la energía del anterior con la mayor capacidad de almacenamiento de la energía del último. Puede ampliar la vida de una batería, reduciendo los costes del reemplazo y de mantenimiento.

El uso de supercondensadores para almacenar la energía procedente de un frenado regenerativo puede mejorar enormemente la eficacia del combustible. Así los supercondensadores pueden capturar y almacenar cantidades grandes de

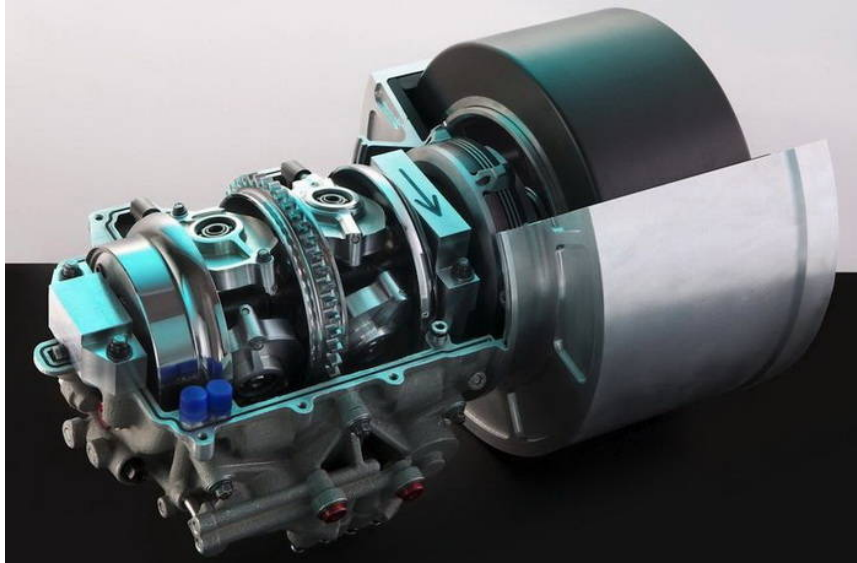
energía eléctrica (generada frenando) y devolverlas rápidamente para la aceleración.

#### 2.1.7 Almacenamiento de energía en volantes de inercia electromagnéticos.

Un volante de inercia, también conocido como batería mecánica, simplemente es una masa que rota sobre un eje. El tipo de energía almacenada en un volante de inercia mecánicamente es energía cinética. La energía es proporcionada al volante de inercia por un motor eléctrico acoplado al mismo eje, mediante el cual el volante eleva su velocidad hasta su valor nominal (proceso de carga). La devolución de la energía se realiza haciendo funcionar a la máquina eléctrica como generador y en este proceso el volante de inercia reduce su velocidad hasta un valor mínimo de diseño (proceso de descarga).

Las ruedas volantes son uno de los más antiguos y más comunes legados mecánicos. Se perfilan como componente importante en los vehículos y las necesidades energéticas futuras. Los volantes de inercia son una de las tecnologías más prometedoras para sustituir las baterías ácidas de plomo convencionales como sistemas de almacenamiento de energía para una variedad de usos, incluyendo los automóviles, sistemas rurales económicos de electrificación y unidades de energía independientes, usadas comúnmente en la industria de las telecomunicaciones. Los avances recientes en las características mecánicas de compuestos han reencendido el interés por el uso de la inercia de un cilindro que gira para almacenar energía.

Además de la densidad de energía, los sistemas de almacenamiento de energía mediante volante de inercia “flywheel energy storage” (FES) también ofrecen varias ventajas importantes sobre el resto de métodos de almacenamiento de energía. La velocidad con la cual la energía se puede intercambiar (potencia) está limitada solamente por el motor eléctrico acoplado al volante de inercia. Por lo tanto, es posible intercambiar grandes cantidades de energía en un periodo de tiempo más corto que con las baterías químicas tradicionales. Por supuesto también es posible cargar rápidamente las baterías mecánicas (FES) lo cual las podría hacer deseables para el uso en los coches eléctricos donde el tiempo de la carga podría ser cuestión de minutos.



*Figura 8: Imagen de un volante de inercia acoplado a un motor eléctrico para trabajar en la restitución de la energía en automóviles.*

### 3 Introducción al volante de inercia electromagnético

El almacenamiento cinético es una técnica que permite guardar la energía empleando para ello elementos mecánicos rotativos. El elemento más común para realizar estas tareas es el volante de inercia electromagnético o flywheel.

En los últimos años el interés en esta tecnología ha aumentado debido al fuerte impulso que está sufriendo la sociedad por investigar en tecnologías que sean lo menos perjudiciales para el medio ambiente y a la vez más eficientes que las aquellas consolidadas. Debido a esto han aparecido dos importantes mercados potenciales: el de los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía procedente de la red eléctrica. Ambos han producido que se retome nuevamente su desarrollo.

El volante de inercia electromagnético o flywheel (FES), es un dispositivo que es capaz de almacenar la energía cinética de rotación en su masa giratoria. Esta masa se trata de un rotor conectado a un motor/generador, de forma que puede utilizarse como fuente de energía o como captador para su almacenamiento.

#### 3.1 El volante de inercia electromagnético o flywheel

El funcionamiento es bastante simple, cuando se añade energía al volante de inercia, la velocidad de rotación aumenta como consecuencia del principio de conservación de la energía, mientras que si es extraída, la velocidad del rotor se verá reducida. La mayoría de los sistemas usan la electricidad para acelerar o desacelerar el volante, debido a su capacidad de regulación y elasticidad de uso.

Para lograr que la autodescarga del sistema sea mínima, el dispositivo está ideado para reducir las pérdidas producidas en el proceso de almacenaje al mínimo. Por ello, el rotor gira sin contacto mecánico alguno entre rotor y estator, ya que está suspendido magnéticamente, además para reducir la fricción con el aire el sistema se crea dentro de una cámara de vacío. De esta forma, se pueden alcanzar velocidades superiores a 100.000 rpm.

También debemos hablar de la seguridad, ya que es un factor muy importante. Los antiguos volantes de inercia resultaban peligrosos cuando se producía un fallo, debido a la gran masa del rotor. Los nuevos volantes de inercia poseen una elevada seguridad, ya que, al estar fabricados con mejores materiales compuestos que permiten alcanzar fuertes fuerzas del sistema sin que se rompa este, el volante se desintegra dentro de la carcasa sin originar daños en el exterior ni al usuario.

Además disponen de un sistema de seguridad controlado electrónicamente capaz de limitar la velocidad de giro, para evitar excesos de velocidad que podrían destruir el volante o activar un frenado de emergencia en caso necesario.

Resulta una manera limpia y sencilla de almacenamiento de energía, aunque evidentemente, la viabilidad del empleo de volantes de inercia depende de algunos

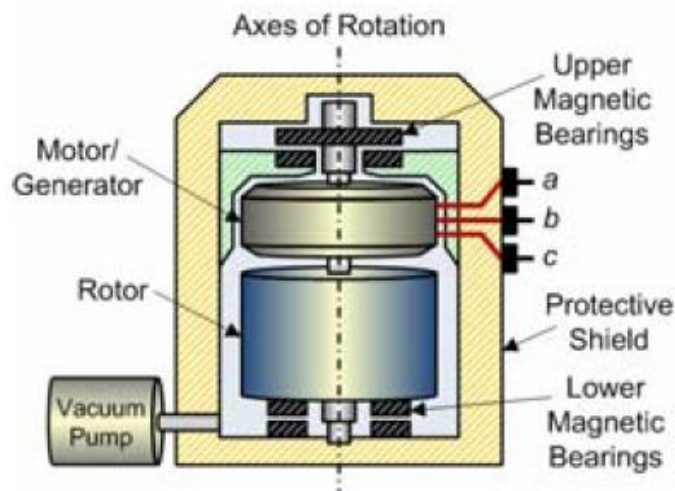
factores tales como el número de ciclos de vida, los costes de fabricación y explotación, los materiales empleados, etc.

### 3.1.1 Componentes del volante de inercia electromagnético

Los componentes esenciales para crear un volante de inercia electromagnético son:

- Rotor
- Motor-Generador
- Rodamientos
- Bomba de vacío
- Carcasa protectora

En la siguiente imagen se pueden observar los elementos mencionados anteriormente puestos en conjunto para formar el volante de inercia electromagnético.



*Figura 9: Esquema de componentes de un flywheel típico para almacenamiento de la energía.*

Como bien podemos intuir la finalidad idónea de un volante de inercia electromagnético sería la de gestionar el consumo de energía al igual que si eficiencia en el progreso de captación. La capacidad de almacenamiento es un punto muy importante en el que se ha investigado mucho al respecto en los últimos años.

Siempre se tiende a gestionar de tal forma que el sistema tenga la menor fricción posible ya sea en los rodamientos como en la resistencia que pueda oponer el aire al rotor. Por eso gracias a los avances tecnológicos de los que disponemos podemos desperdiciar ciertas fuerzas y eliminar pérdidas que antes eran irremediables para el sistema.

Un aspecto no menos importante es la recuperación de energía que seamos capaces de alcanzar. Si nuestro sistema está bien sincronizado obtendremos



resultados más eficientes ya que al trabajar con varios volantes el acoplamiento mutuo es vital para su correcto funcionamiento.

Su diseño y el de sus componentes, por ello, está encaminado a minimizar las pérdidas energéticas y aumentar la densidad energética del dispositivo.

### 3.1.2 Rotor

El elemento principal del volante de inercia es el rotor. Este es el encargado de contener la energía en su giro y de conservar la energía el mayor tiempo posible.

La energía cinética acumulada en un sólido rígido en rotación es función lineal de la masa y aumenta con el cuadrado de la velocidad, por lo que incrementar la velocidad de rotación produce grandes incrementos en la densidad energética de almacenamiento.

$$Ec = \frac{1}{2} I_{\delta} \omega^2$$

Se intentara siempre que sea posible que la capacidad por generar energía cinética sea lo más alta que el sistema pueda soportar. Como bien indica la formula no solo aumentando la velocidad angular conseguiremos resultados altos, también cuanto mayor sea el momento de inercia del sólido rígido mejoraremos la energía cinética total del sistema que sea capaz de acumular para luego poder aprovecharlo como energía recuperada.

$$I_{\delta} = \frac{1}{2} MR^2$$

En los primeros rotores que se desarrollaron estaban hechos de acero, lo cual hacía que el peso fuera demasiado elevado y las fricciones y las fuerzas en los apoyos muy elevados con lo cual era difícil llegar a altas velocidades y así poder crecer la eficiencia de almacenaje. Con lo cual hoy en día se buscan rotores ligeros que posean alta resistencia mecánica, para conseguir altas velocidades de giro, y por lo tanto poder almacenar la máxima energía posible con el menor peso. De esta forma se obtienen valores de densidad energética mucho mayores.

En la siguiente tabla analizamos alguno de los diferentes compuestos y como varían sus resultados con respecto a lo que hemos mencionado anteriormente.

MATERIAL	RESISTENCIA LIMITE (GPa)	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ENERGÉTICA (Wh/kg)
Acero	2.7	7800	47
Kevlar	3.8	1450	370
Grafito	7.0	1780	545

Como bien observamos el grafito es el material con mayor densidad energética y con una densidad no muy elevada con lo que lo convierte en el material más empleado para la construcción de rotores. La resistencia límite del grafito es muy elevada y lo hace idóneo para soportar grandes esfuerzos debido a las altas velocidades obtenidas al almacenar o restituir energía.

Para la construcción del volante que será necesario acoplar al rotor se utiliza el método de enrollamiento de filamento. Este método consta de cuatro principales etapas:

1. Diseño, geometría del volante, orientación de la fibra y la selección de materiales. Normalmente, por condiciones de fiabilidad y seguridad, el sistema se diseña para funcionar en un intervalo entre el 37,5% y el 75% de la resistencia máxima del material (entre 45000 y 90000 r.p.m.). El volante suele estar compuesto de un anillo interior de níquel y aluminio, y de dos tornillos exteriores de material compuesto. La orientación de la fibra se da a partir del ángulo entre el eje del enrollamiento y la dirección de la fibra. Suele ser de  $87^\circ$ .
2. Control y selección de las condiciones del proceso de fabricación. Los anillos de material compuesto se elaboran a partir de un enrollamiento de filamento de fibras de grafito, impregnadas en resina de epoxi que actúa de aglutinante, sobre un torno de acero inoxidable. Para impregnar dicha fibra, se hace pasar el filamento por un baño de resina líquida antes de enrollarse en el torno. Las fibras ya enrolladas son sopladas con aire a presión para eliminar el exceso de resina y consolidar a su vez la adhesión de unas con otras. Acabado el enrollamiento, las fibras se curan a  $80^\circ\text{C}$  durante una hora para la resina pueda fluir, y a  $170^\circ\text{C}$  durante dos horas para curar el epoxi de la forma más eficiente.
3. Mecanizado y ensamblaje del volante. Para conseguir una adhesión duradera entre los anillos de material compuesto, estos se impregnan con resina epoxi y se presionan juntos con una fuerza muy elevada. Cuando se consigue una adhesión correcta, se elimina una pequeña capa de los bordes superior e inferior de los anillos. El anillo metálico se introduce en el interior de los otros a presión.
4. Ensayo de materiales para comprobar su resistencia. Después del proceso de fabricación, la fibra ha perdido aproximadamente un 25% de su resistencia, ya que el mecanizado rompe algunas fibras. Para comprobar las propiedades del material, se determina la fracción en volumen de fibras y se realiza un ensayo no destructivo a tracción en la dirección de las fibras.

### 3.1.3 Motor-generator

Parte fundamental del sistema es el motor-generator. Este se encargará de transformar la energía cinética producida en corriente eléctrica o en aplicar corrientes eléctricas en los devanados para transformarla en energía mecánica en

forma de rotación en el rotor. Con lo cual podremos almacenar esa energía eléctrica en forma de rotación, gracias al volante de inercia, que se encargará de mantener el giro en el eje el mayor tiempo posible, para después restituirlo a placer del usuario.

La máquina eléctrica que impulsa y decelera al volante, ha de ser capaz también, de girar a velocidades muy altas, entre las decenas y el centenar de miles de vueltas con un rendimiento muy alto.

Esta es la razón por la que se suelen utilizar máquinas eléctricas de corriente continua sin escobillas (BLDC) de imanes permanentes. Esto se debe a la sencillez de funcionamiento de los motores de continua, tanto como motor como generador. Además la supresión de cableado en el rotor gracias al empleo de imanes permanentes hace que el sistema sea muy simple, ya que se alcanzan velocidades muy elevadas. También podemos destacar la ausencia de los devanados de excitación que evita el gasto energético para producir el campo magnético.

Dado que las escobillas se han eliminado y no hay rozamiento a través del rotor no tendremos un desgaste exhaustivo en la máquina. Ahora la electrónica de control será más compleja pero en cambio facilitará su control y mejorará el rendimiento energético del sistema. Puesto que ahora el número de revoluciones será muy elevado se hace inviable el uso de las escobillas debido al desgaste, mantenimiento, suciedad generada por el polvo del rozamiento, contacto irregular...

#### 3.1.4 Rodamientos

Los rodamientos juegan un papel fundamental también en el sistema, ya que no solo son los encargados de permitir el giro del conjunto con la menor fricción posible, sino que también deberán soportar fuerzas muy elevadas debido al momento de inercia generado por el volante y la velocidad de giro del sistema.

Deberán ser capaces de girar a revoluciones muy elevadas con un rozamiento nulo o muy pequeño para permitir que la conservación de la energía sea la mayor posible.

En los primeros diseños se utilizaban rodamientos mecánicos convencionales, pero en la actualidad se emplean rodamientos magnéticos lo cual disminuye notoriamente la fricción y permite tiempo mayor de giro por parte del rotor. El sistema de esta forma tiene pérdidas rotacionales muy bajas debido a que impiden el contacto entre las partes estacionarias y rotativas de apoyo.

Para poder suspender magnéticamente el volante, se recurre a imanes permanentes para mantener la posición del volante en dirección axial y a electroimanes para mantener la posición en dirección radial, con lo cual conseguimos centrar el volante sobre el eje de giro.

Estos cojinetes magnéticos convencionales tienen bajo consumo específico de energía (W/g), que se disipa en forma de calor en el cobre de los electroimanes de los cojinetes. La pérdida dependerá de la estructura del cojinete y sistema de

control que utilicemos. Los cojinetes magnéticos basados en superconductores han demostrado pérdidas muy bajas de alrededor de 3 W/kg en rotores a bajas velocidades. Esto nos da una idea de cuánto podría ser de eficiente el sistema puesto que superaría el 90 % del total.

### 3.1.5 Bomba de vacío

Como hemos explicado anteriormente al introducir rodamientos magnéticos eliminamos prácticamente las pérdidas por rozamiento en los puntos de apoyo pero quedan aún pérdidas que no hemos sido capaces de solventar. El aire es la principal fuente de esa pérdida, dado que el rozamiento del rotor con el aire provoca unas pérdidas por fricción. Para evitar estas pérdidas, se utiliza una cámara de vacío gracias a una bomba que presuriza la cámara en la que trabajará nuestro sistema. Con esto reducimos notablemente la resistencia aerodinámica del rotor, y de esta manera se permite que el sistema alcance una mayor eficiencia y un aumento en la capacidad de almacenaje que es lo nos interesa. El vacío, como se menciona anteriormente, se consigue por medio de una bomba de vacío ( $10^{-6}$  atm) o mediante una bomba de difusión que es un poco mas efectiva a la hora de provocar el vacío dentro de la cámara ( $10^{-8}$  atm).

### 3.1.6 Carcasa protectora

Puesto que ya hemos descrito todos los elementos activos del sistema nos queda por describir un elemento pasivo no menos importante que el resto y que proporciona la seguridad del sistema. Su composición material no debe ser muy pesada pero al mismo tiempo debe ser muy resistente capaz de soportar grandes fuerzas internas debido al volante de inercia y los momentos que se generan debido a la velocidad del giro. Debe ser capaz de contener dentro de sí misma al rotor en caso de fallo o avería, también debe ser ligera y debe ser concebida en su diseño para poder mantener el vacío en su interior.

## 3.2 Historia, antecedentes y evolución en los usos del volante de inercia.

A mediados del siglo XX comenzó el desarrollo de los volantes de inercia para proveer energía a vehículos autopropulsados, debido a la falta de combustibles e hidrocarburos ocasionada por la Segunda Guerra Mundial. El interés por esta tecnología hizo que una pequeña empresa llamada Oerlikon fabricara una locomotora de impulsión dual: su medio de propulsión se combinaba entre un motor diésel que transmitía energía al volante de inercia el cual la restituía momentos después del apagado del motor diésel.

Una vez detenido el motor de combustión el volante era el encargado de energizar el tren y liberar la energía almacenada que había conservado posteriormente gracias al motor. Debido al suceso de este prototipo, se pasó a su puesta en servicio en una localidad de Suiza (Altdorf). Meses después se detuvo para perfeccionar los dispositivos y mejorar su diseño.

Se retomó el desarrollo años después, instalando la primera línea regular de girobuses entre las poblaciones suizas de Yverdon-les-Bains y Grandson. El girobus alcanzaba una velocidad máxima de 60 km/h con una carga de 14 toneladas, recibiendo la energía inicial a partir de tomas eléctricas ubicadas en postes cada 5 kilómetros, la electricidad pasaba a un alternador dentro del girobus y era transferida mediante embragues como energía mecánica al motor con un gran volante inercial de 3 toneladas que giraba en condiciones normales a una velocidad de entre 2100 y 3000 rpm, dentro de una carcasa estanca rellenas de hidrogeno.

En la imagen siguiente podemos observar un esquema de funcionamiento y distribución de un girobus tal y como se puso en servicio a mediados del siglo XX. También se observa su estación de carga para alimentar el volante de inercia y cargarlo de energía cinética para luego ser restituida en sus trayectos de servicio.

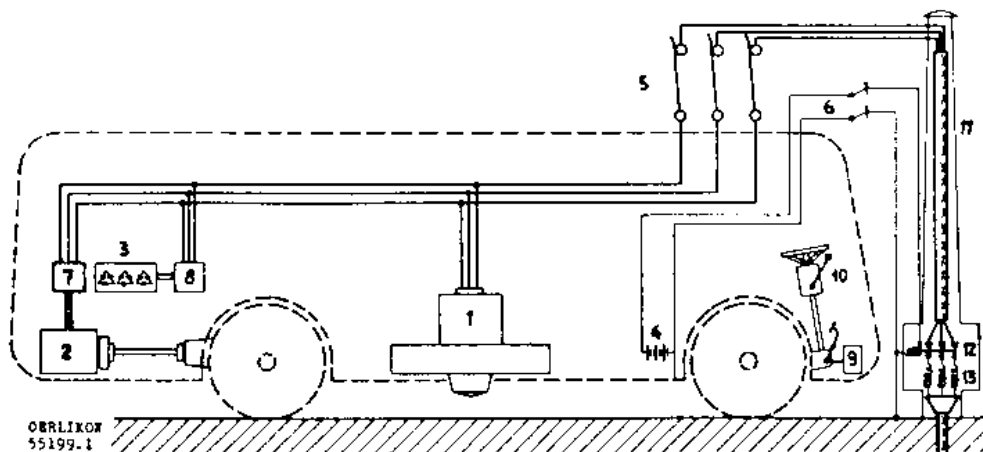


Figura 10: Planto técnico de un girobus a mediados del siglo XX

Después del éxito de los girobuses se probó su instalación en otros países como en la actual Kinshasa (antiguo Congo Belga). En 1956 la importante ciudad belga de Gante estableció una prolongada línea de girobuses que comunica el sur de la ciudad (Zuid Gent) con las poblaciones satélites de Zwijnaarde y Merelbeke.

En 1980 la cooperativa sueca AB Volvo diseño y comenzó la fabricación de girobuses duales, cuyo impulso inicial es otorgado por un motor diésel (eventualmente biodiesel). En 2005 el Center for Transportation and the Environment (centro para la Transportación y el Ambiente) de la Universidad de Texas en Austin ha comenzado el desarrollo de proyectos similares para su fabricación en Estados Unidos.

En el presente los girobuses pueden poseer volantes inerciales que rotan a 100.00 rpm y se encuentran dentro de un recipiente al vacío en el cual unos cojinetes magnéticos reducen al máximo la fricción y el desgaste. Esto hace que sean realmente efectivos llegando a superar en trayectos de 100 km a los recientes motores o células de hidrogeno o, más aun, a los automotores impulsados

convencionalmente por baterías eléctricas. Los girobuses no emiten gases contaminantes (los motores diésel que aportan la energía cinética inicial pueden ser fácilmente substituidos por motores eléctricos), si bien a diferencia de trolebuses y tranvías los girobuses no requieren del oneroso y hasta peligroso cableado o tendido de carriles y puede operar con una flexibilidad de la que los otros vehículos indicados carecen (a no ser que se trate de un híbrido posible: trolegiobús). Los girobuses se caracterizan por ser transportes silenciosos. Un girobús al no emitir gases evita el calentamiento global.

A principios de los años noventa, Rosen Motors diseñó un sistema que se basaba en una turbina de gas que era capaz de girar a 55.000 rpm con el objetivo de propulsar un automóvil. La turbina accionaba un volante de inercia, y su objetivo era proporcionar ráfagas de aceleración que la pequeña turbina no era capaz de proporcionar. El volante de inercia estaba montado sobre un junta cardan para minimizar los efectos giróscopos adversos sobre el manejo del vehículo. El prototipo fue probado con éxito por carretera en 1997, pero nunca se llevó a cadena de producción por una serie de adversidades.

Un gran avance reciente para el mundo del transporte privado fue llevado a cabo por la compañía Volvo. En 2013, presentó un sistema de volante de inercia montado en un coche de serie. Su sistema de frenado permite recuperar la energía cinética del automóvil acelerando el volante cinético hasta las 60.000 rpm, mientras que se detiene el motor de combustión. La energía almacenada en el volante se utiliza posteriormente para propulsar el vehículo total o parcialmente, ofreciendo una reducción del consumo de hasta el 25 %.

En competiciones automovilísticas como la Formula uno o las 24 horas de Le Mans se han empezado a usar en los últimos años, gracias al empleo de una transmisión continua variable (CVT), que permite al igual que el Volvo, almacenar energía durante la frenada para seguidamente utilizarla en la aceleración.

Se han probado también varias opciones en el sector ferroviario, ubicados tanto en el material rodante, como en las subestaciones que alimentan de energía eléctrica la catenaria. Sobre los vehículos han sido utilizados tanto en pequeñas locomotoras como la Sentinel-Oerlikon Gyro Locomotive como en locomotoras más grandes como es la British Rail Class 70. Los volantes avanzados, como el desarrollado por la Universidad de Tejas, con una capacidad de 133 kWh, son capaz de acelerar un tren desde parado hasta la velocidad de crucero.

El empleo de volantes de inercia en la electrificación de la catenaria ayuda a regular la tensión de la línea, mejorando la aceleración de los trenes y aumentando la cantidad de energía recuperada durante el frenado regenerativo. Su uso también permite que los trenes sean usados sin modificaciones, disminuyendo su peso y eliminando el momento cinético producido por el volante. Ya se han realizado ensayos sobre esta tecnología en Nueva York, Tokio, Lyon y Londres.

Los volantes de inercia también son utilizados en sistemas de alimentación ininterrumpidos, con el objeto de proporcionar nivelación de carga en los grandes sistemas de baterías, tales como sistemas de alimentación ininterrumpida para

centros de datos, ahorrando considerablemente la cantidad de espacio frente a las baterías y de coste de mantenimiento frente a los sistemas de UPS de baterías convencionales.

También han encontrado una gran aceptación como soporte para equipos de laboratorio debido a la gran capacidad de descarga que permite simular cortocircuitos con intensidades muy altas, que no podrían ser producidas por la red eléctrica.

Otras aplicaciones en las que se utiliza también la capacidad de descarga para proporcionar alta potencia durante un intervalo muy breve de tiempo, son los reactores de fusión Tokamak o láseres de alta potencia. Esta tecnología se ha llevado incluso en portaviones USS Gerald R. Ford, en el que se utilizan para acumular energía de la red eléctrica de a bordo, ya que para poder activar el sistema de accionamiento para el lanzamiento de aeronaves que posee, necesita un pico de potencia muy elevado, no siendo el sistema instalado a bordo capaz de generarlo y seguir dando soporte al resto de aparatos. Por eso tal tecnología sirve para almacenar los excedentes de energía durante la jornada y liberarlos rápidamente cuando sea necesario el lanzamiento de aeronaves. El sistema tiene una capacidad de almacenaje de aproximadamente 100 MJ.

Esta aplicación muy similar se empleó también en un parque de atracciones para una montaña rusa llamado Hulk en Orlando (U.S.A). El sistema de propulsión alimentado por un volante electromagnético tiene como objetivo proporcionar la intensidad de corriente necesaria en su aceleración, y absorber la generada en su frenado. Sin este sistema operativo se producirían continuas caídas y subidas de tensión en la red eléctrica local, que pondrían en peligro la estabilidad del sistema y además supondrían de un coste económico muy alto.

Las redes eléctricas convencionales también pueden beneficiarse del desarrollo de los volantes de inercia electromagnéticos, ya que mediante el almacenamiento de energía aumenta la capacidad de regulación de la red, reduciendo las emisiones de carbono, mejorando los tiempos de respuesta y reduciendo el gasto económico gracias a que permite comprar energía en las horas valle. La empresa Beacon Power ya ha instalado un sistema de 5MWh de capacidad, que es capaz de suministrar 20 MW durante más de 15 minutos en Stephentown, Nueva York (EEUU).

En la siguiente imagen se encuentra un volante de inercia para uso en la red eléctrica desarrollado por Beacon Power. Podemos observar las carcassas en el parque de la empresa y un esquema con sus componentes principales. La capacidad de regulación eléctrica que proporcionan los volantes de inercia también está siendo desarrollada para sistemas de generación distribuida basada en renovables, que permiten almacenar la energía generada por los aerogeneradores o paneles fotovoltaicos durante los periodos de baja demanda o periodos de alta producción.



*Figura 11: Volantes de inercia utilizados para almacenar la energía y reutilizarla en horas punta.*

La compañía Beacon Power es pionera en esta tecnología y comenzó a probar su sistema Smart Energy (Gen 4) en el parque eólico de Tehachapi, California (EEUU) en 2010. Actualmente ya han pasado a instalar dos más en EEUU.



## 4 Tipos de Motores DC según su uso y aplicación

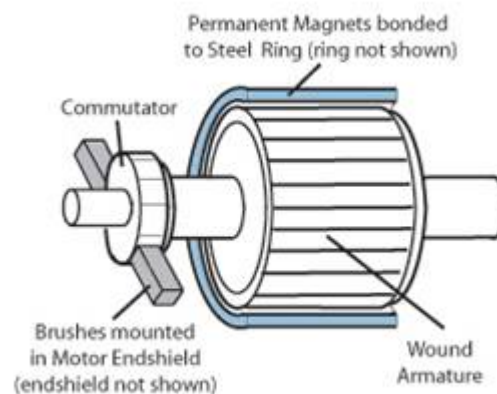
Un motor de CC es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica de CC en movimiento mecánico. Existe una gran variedad de motores para las diferentes aplicaciones y requisitos de potencia, desde pequeños dispositivos de apenas unos pocos milímetros de diámetro para equipo médico, hasta diseños personalizados que generan miles de caballos de fuerza.

Los dos tipos más comunes de motores de CC se conocen como CC con escobillas y CC sin escobillas (BLDC). Aunque la física subyacente es la misma, su construcción, características de rendimiento y medios de control son muy diferentes.

Según su aplicación y uso cada tipo de motor tiene sus ventajas y sus desventajas. A continuación se explicarán los aspectos fundamentales de cada tipo de máquina y para que campo sería conveniente su uso.

### 4.1 Construcción y operación de un motor de CC con escobillas

Inventado en 1800, el motor de CC con escobillas es uno de los tipos de motores más sencillos. Fueron el primer tipo en utilizarse ampliamente, ya que se alimentaban de sistemas de distribución de energía de iluminación de corriente directa.



*Figura 12: motor CC con escobillas.*

Como se muestra en la figura, un motor de CC con escobillas típico se compone de un armazón giratorio y un estator fijo.

El armazón (también llamado rotor) contiene una o más bobinas de alambre aislado envueltas alrededor de un núcleo de hierro suave. Los bobinados forman una o más bobinas y están eléctricamente conectados al conmutador, el cual es un cilindro compuesto de varios segmentos de contacto de metal alrededor del eje del armazón. El estator encierra el rotor y contiene imanes permanentes o electroimanes para generar un campo magnético. Las escobillas son contactos eléctricos, hechas de un material blando como el carbono, las cuales tienen resortes para hacer contacto con los segmentos del conmutador a medida que el eje gira.

Cuando una fuente de alimentación de CC está conectada a las escobillas, las bobinas del armazón se energizan, convirtiéndolas en un electroimán y causando que giren de forma que sus polos norte y sur se alineen con los polos norte y sur del estator, respectivamente. A medida que el conmutador gira, el movimiento hace que la polaridad de la corriente en la bobina de la armazón, y la dirección de su campo magnético, se invierta. El armazón gira hacia su nueva alineación, la corriente se invierte de nuevo y el armazón continúa girando.

Este medio para invertir la corriente se denomina conmutación mecánica y la rotación mecánica del eje proporciona la información necesaria para cambiar la polaridad de la corriente.

Al variar la disposición de los bobinados, es posible desarrollar diferentes variedades de motores de CC con escobillas con distintas características de rendimiento. Existen cinco tipos básicos. Los cuatro primeros tipos utilizan bobinas en el estator y el rotor (armazón), por lo que utilizan solo electroimanes:

- Un motor de CC con escobillas con bobinado en derivación tiene las bobinas de campo del rotor y el estator conectadas en paralelo y funciona a una velocidad constante independientemente de la carga. Esta característica de auto-regulación hace que sea ampliamente utilizado en aplicaciones industriales de velocidad constante.
- Un motor de CC con escobillas de bobinado en serie tiene las dos bobinas enrolladas en serie; cuya velocidad varía con la carga, lo que aumenta a medida que la carga disminuye. Sin embargo, tiene un torque de arranque muy alto, por lo que se utiliza ampliamente para aplicaciones de corta duración, como arrancadores de automóviles.
- Un motor de CC con escobillas de bobinado compuesto es una combinación de los motores de bobinado en serie y derivación, con características de ambos. Los motores de bobinado compuesto generalmente se utilizan cuando se detectan condiciones de arranque severas y se requiere una velocidad constante.
- Un motor de CC con escobillas de excitación independiente tiene suministros separados para el rotor y el estator, lo que genera una alta corriente de campo del estator y la suficiente tensión del armazón para producir la corriente de torque de rotor requerida. Este tipo de motor se usa cuando se requiere una alta capacidad de torque a bajas velocidades.
- Un motor de CC con escobillas de imán permanente contiene imanes permanentes en el estator, lo que elimina la necesidad de una corriente de campo externa. Este diseño es más pequeño, más ligero y con un uso más eficiente de energía que otros tipos de motor de CC con escobillas, y se utiliza ampliamente en aplicaciones de baja potencia de hasta aproximadamente 2 HP.

## 4.2 Control del motor CC con escobillas

Puesto que la conmutación se realiza mecánicamente, controlar un motor de CC con escobillas es conceptualmente muy simple. Un motor de velocidad fija solo necesita una tensión de CC y un conmutador de encendido/apagado; el que al variar la tensión cambia la velocidad a través de un amplio rango.

Para las aplicaciones que requieren un control más sofisticado, se puede utilizar una topología de circuito común como el puente en H. Al girar los transistores Q1 y Q4 simultáneamente, o los transistores Q3 y Q2 simultáneamente, la corriente a través del motor BDC fluye en un sentido o en el otro, permitiendo el movimiento bidireccional.

Para el control de la velocidad, se utiliza una señal modulada por el ancho de pulso (PWM) para generar una tensión media. El bobinado del motor actúa como un filtro de paso bajo para que una forma de onda de PWM de alta frecuencia genere una corriente estable en el bobinado del motor. Para una regulación de la velocidad más precisa, se puede añadir un sensor de velocidad como un sensor de efecto Hall o codificador óptico para formar un sistema de control de lazo cerrado.

## 4.3 Resumen del motor de CC con escobillas

Los motores de CC con escobillas son económicos y confiables, y tienen una alta razón de torque a inercia. Debido a que necesitan pocos o ningún componente externo, también son adecuados para la operación en condiciones exigentes.

En el lado negativo, las escobillas se desgastan con el tiempo y producen polvo. Por ello, los motores con escobillas necesitan un mantenimiento periódico para la limpieza o sustitución de las escobillas. Otras desventajas son la mala disipación del calor debido a las limitaciones del rotor, alta inercia del rotor, baja velocidad máxima e interferencia electromagnética (EMI) generada por el arqueado de las escobillas.

## 4.4 Construcción y operación de los motores de CC sin escobilla

El principio subyacente de la operación de un motor de CC sin escobillas (BLDC) es el mismo que el de un motor de CC con escobillas: el control de la conmutación mediante la realimentación de la posición del eje interno, pero su construcción es muy diferente.

En contraste con el motor de CC con escobillas, el imán permanente está montado sobre el rotor del BLDC, el estator está hecho de acero laminado y con ranuras, y contiene los bobinados.

Los BLDC tampoco utilizan escobillas de carbono o un conmutador mecánico. Forzar al rotor a girar se realiza energizando sucesivamente las bobinas alrededor

del estator y la conmutación se logra mediante un controlador electrónico complejo utilizado en conjunto con un sensor de posición del rotor (por ejemplo, un sensor LED fototransistor, electromagnético o de efecto Hall).

El método de construcción del BLDC le permite tener menos resistencia interna y mucho mejor disipación del calor en las bobinas del estator. Esto se traduce en una mayor eficiencia operativa debido a que el calor de las bobinas se puede disipar de forma más eficiente a través de la carcasa más grande del motor estacionario.

Los bobinados del estator pueden organizarse en un patrón de estrella (Y) o delta. Las laminaciones de acero pueden ser con o sin ranuras. Un motor sin ranuras tiene menor inductancia, así que puede funcionar a velocidades mayores y exhibe menos rizado a velocidades más lentas. La principal desventaja de un estator sin ranuras es su mayor costo debido a que requiere más bobinados para compensar el mayor espacio de aire.

El número de polos del rotor puede variar dependiendo de la aplicación. Aumentar el número de polos aumenta el torque, pero reduce la velocidad máxima. El material utilizado para construir los imanes permanentes también tiene un efecto sobre el torque máximo, que se incrementa con la densidad de flujo.

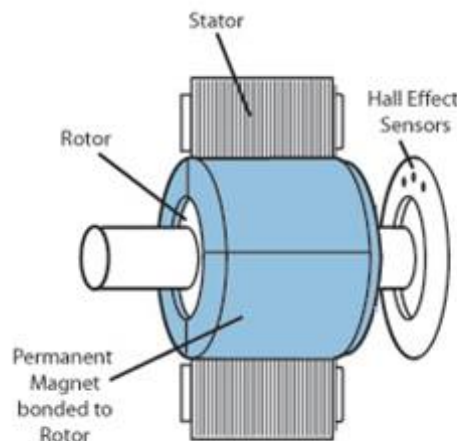


Figura 13: Motor de CC sin escobillas (BLDC).

#### 4.5 Resumen del BLDC

Sin un conmutador mecánico o escobillas que se desgasten, los motores de CC sin escobillas son de bajo mantenimiento y no producen chispas. Además, tienen menor inercia y fricción del eje, menos ruido audible y mucho mejor relaciones torque-peso (densidad de potencia), por lo que son mucho más pequeños en tamaño que un motor de CC con escobillas.

En comparación con los motores de CC con escobillas, los motores BLDC tienen una variedad de ventajas de rendimiento. Tienen un alto torque de arranque y el torque es plano hasta la velocidad nominal. Debido al control electrónico en

tiempo real, su regulación de velocidad es precisa e insensible a las variaciones de la carga. Puesto que el calor se genera en el estator externo y no el rotor interno, es más fácil mantenerlos frescos. Y la falta de escobillas significa que producen menos ruido eléctrico y pueden funcionar a velocidades superiores a 100 000 RPM en algunos casos.

#### 4.6 Soluciones de control de motores de CC disponibles

Como hemos visto, aunque el control simple del motor de CC con escobillas es fácil de lograr, un control más preciso de los motores de CC con escobillas y sin escobillas no es nada sencillo.

La buena noticia es que existen varias soluciones listas para usar disponibles que emparejan los motores con los controladores adecuados. A nivel de dispositivo, Arrow Electronics ofrece numerosos controladores de motor de fabricantes líderes, que incluyen los motores de CC con y sin escobillas. Además, puesto que el control del motor es un gran mercado, muchos proveedores ofrecen kits de desarrollo, diseños de referencia y bibliotecas de software dirigidas al control de los motores de CC.

A continuación pasaremos a explicar más en detalle los motores DC sin escobillas los cuales hemos elegido para el diseño del prototipo.

## 5 Motores DC sin escobillas (BLDC)

Los motores BLDC se fabrican de dos tipos, inrunner y outrunner. Los primeros desarrollan mayor velocidad y suelen ser más pequeños, entregan su torque máximo a muy altas revoluciones por minuto, por lo que se usan siempre con engranajes reductores.

En estos motores el elemento móvil es el eje, sobre el cual se encuentran instalados los imanes permanentes; Por otra parte los motores outrunner desarrollan su torque máximo a velocidades más bajas, por lo que usualmente no necesitan reducción, y se pueden acoplar directamente a una hélice. En estos los imanes permanentes están instalados en la carcasa externa del motor, que en este caso es la que gira y el bobinado se encuentra fijado al eje.

Estos motores trabajan por medio de variadores, también llamados controladores de velocidad (electronic speed controler o ESC), que transforman la corriente continua de las baterías en una tensión alterna trifásica y la alimentan a los bobinados en cierta secuencia dependiendo de la posición del rotor.

Para manejar los motores se precisa el conocimiento de la posición del rotor en cada momento, para lo cual se utilizan dos técnicas básicamente, dependiendo de la existencia o no de sensores en el motor, lo que los divide en dos familias: con sensores (sensored) y sin sensores (sensorless).

- **Sensored:** Disponen de sensores de efecto hall o de encoders que indican la posición del rotor. Es habitual que tengan 3 sensores separados  $120^\circ$ , uno para cada bobinado del motor.
- **Sensorless:** No tienen sensores; la posición se determina mediante la medición del efecto de la fuerza contra electromotriz sobre las bobinas.

### 5.1 Sistema de control en un motor BLDC

En la mayoría de las aplicaciones, un sistema de control BLDC, contiene cuatro bloques diferentes:

- La etapa de potencia, que se encargará de accionar el motor que habitualmente se implementa con transistores MOSFET de potencia.
- Los circuitos de retroalimentación para detectar la posición del rotor y para realizar la detección.
- Un microcontrolador (MCU o Digital Signal Controller-DSC) para obtener los impulsos PWM de activación de los bobinados impulsores (6 señales en total), para procesar las informaciones de control de velocidad y para el mantenimiento del régimen de trabajo.
- Los reguladores de tensión de alimentación para energizar los circuitos digitales, analógicos y de accionamiento de los transistores MOSFET

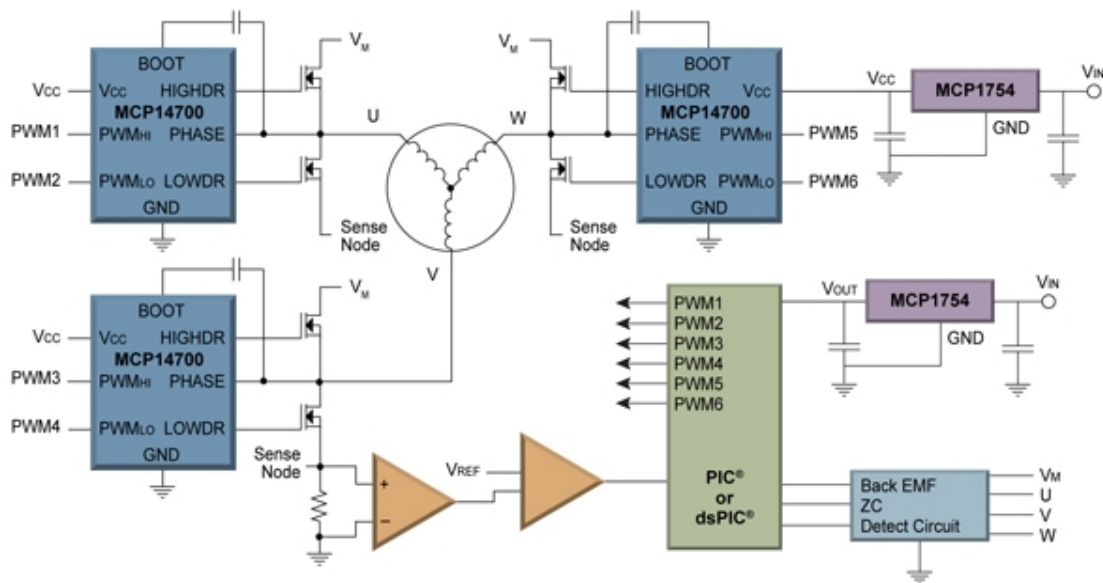


Figure 1. Application Example of a MCU-based Discrete Design for a Three-Phase BLDC Motor

Figura 14: Esquema de un microcontrolador para obtener los impulsos PWM de activación por parte de los bobinados (MCU o Digital Signal Controller-DSC)

La posición del rotor, puede ser detectada mediante los sensores de efecto Hall, o distintas técnicas que no utilicen los sensores para medir la posición exacta del rotor y así poder alimentar las fases según la posición en la que se encuentre. En estos casos (sensorless) los métodos son generados por los dos bobinados que no están siendo activados pero que generan una contra-FEM.

Para lograr estos objetivos y procesar las señales de manera apropiada, el microcontrolador dedicado debe tener los periféricos necesarios para llevar a cabo con éxito la aplicación específica, la técnica de accionamiento y el método de detección de posición. Tanto el microcontrolador como los transistores MOSFET, requieren de una fuente de alimentación regulada, que puede ser proporcionada por reguladores de baja caída de tensión entre las tensiones de entrada y la salida a los mismos (LDO). En los casos en que no sea posible utilizar este tipo de reguladores, los *sistemas conmutados* pueden ser una solución apropiada para reducir la disipación de potencia, en forma de calor, junto a un mejor aprovechamiento energético.

A diferencia del circuito anterior, un microcontrolador puede encargarse de proveer las tres fases y otro dispositivo, específicamente dedicado, puede encargarse de la gestión de energía necesaria para todos los circuitos, de la activación de los transistores de potencia y de recibir y procesar las realimentaciones que el sistema devuelve, como posición angular del rotor del motor o como sensor de corriente de funcionamiento de los circuitos de potencia. Además, este sub-circuito puede incorporar conectividad SPI, CAN o LIN para los casos en que sea necesario este tipo de comunicación hacia, o desde el exterior.

De este modo, la potencia de proceso y cálculo que requiere el microcontrolador disminuye notablemente aunque se presenta la desventaja en una limitación dentro de la flexibilidad del diseño, ya que el proceso de control del PWM, en función de la realimentación de información que proviene del motor, se realiza mediante cálculos fijos y constantes. Muchos fabricantes de microcontroladores, en la actualidad, ofrecen este tipo de periféricos dedicados a aplicaciones de control de motores BLDC para optimizar el rendimiento del sistema.

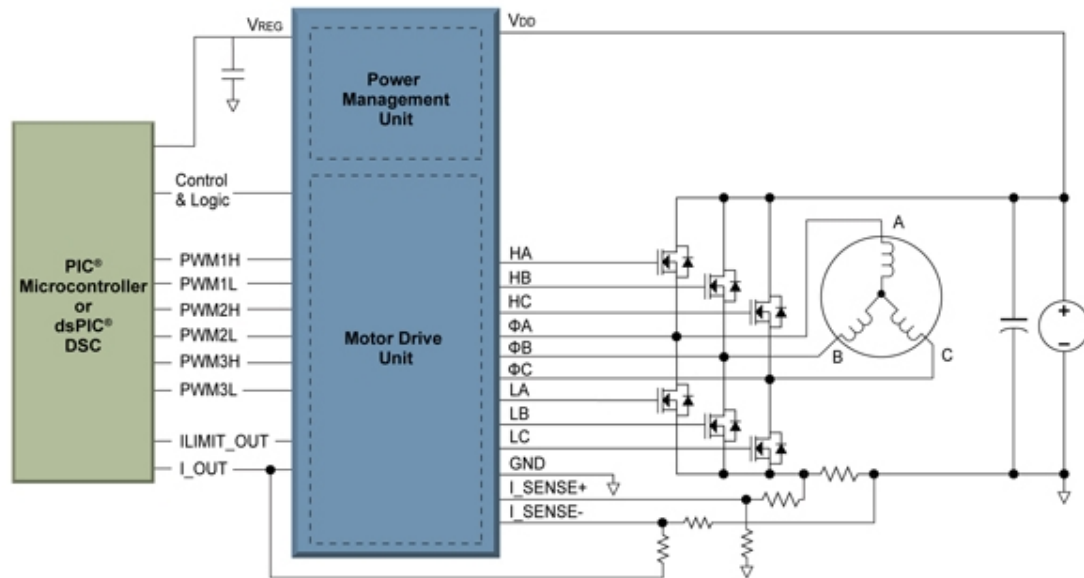


Figure 2. Example of MCU-based Pre-driver Design for 3-Phase BLDC Motor

Figura 15: Esquema de funcionamiento de un microcontrolador específicamente dedicado a la gestión de la energía necesaria para todos los circuitos.

En las aplicaciones actuales, la cantidad de espacio consumido dentro de un PCB y los tamaños finales de los sistemas electro-mecánicos son preocupaciones para muchas aplicaciones trifásicas BLDC. Los circuitos integrados capaces de controlar las tres fases de un motor BLDC reducen la complejidad del sistema y ayudan a cumplir con los requisitos de mínimo espacio dentro de un PCB.

Sin embargo, la fuerza máxima de accionamiento de un motor estará limitada por la posibilidad de disipar potencia, el tipo de encapsulado y el diseño físico-electrónico que posea un circuito integrado específico para cumplir, por sí solo, el control total de un motor BLDC. Estas soluciones, altamente integradas para motores trifásicos BLDC, son típicamente considerados como “dispositivos específicos para aplicaciones estándar” (ASSP – Application-Specific Standard Products). Estos dispositivos se pueden considerar como menos flexibles, en particular, cuando las especificaciones del motor empleado no son totalmente compatibles con el motor para el que fuera realizado el diseño original del circuito integrado.



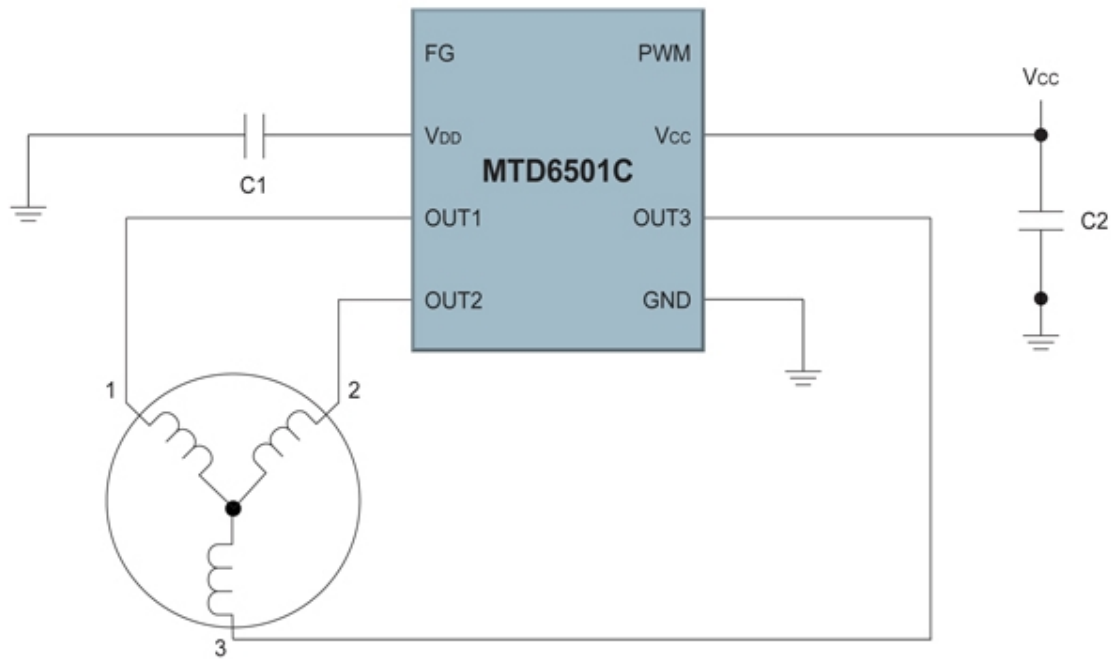


Figure 3. Example of Integrated 3-Phase BLDC Motor Solution

Figura 16: Esquema de un ejemplo integrado de 3 fases para un BLDC (Motor DC sin escobillas)

En el gráfico superior, podemos ver un alto grado de integración para realizar el control de un motor BLDC de tres fases para aplicaciones, por ejemplo, de control de velocidad de un ventilador. Este diseño requiere tan solo de dos componentes discretos externos para impulsar un motor trifásico BLDC, con un control de conmutación del tipo sinusoidal.

En este ejemplo, no hay un microcontrolador involucrado en el sistema, y el mismo opera en un modo de bucle abierto, donde se controla la velocidad del motor por la tensión externa aplicada. Con un microcontrolador en el sistema, cuando se desea operar en una configuración de bucle cerrado, con la retroalimentación de las revoluciones por minuto (RPM) se ingresa por la entrada FG del dispositivo, mientras que el pin PWM se encargará de controlar la velocidad final del motor, en forma predeterminada por el usuario a través del sistema de control.

	MCU + Discrete Circuit	MCU + Pre-driver	Integrated Solution
<b>System Complexity</b>	High	Moderate	Low
<b>PCB Board Space</b>	Large	Moderate	Small
<b>Firmware Development</b>	Yes	Yes	Either
<b>System Flexibility</b>	High	Moderate	Low
<b>Required Design Experience</b>	High	High	Moderate
<b>Easy Adaptation to Different Applications</b>	High	Moderate	Low

Table 1. Pros and Cons of MCU-based Designs vs. Standalone Solutions

Figura 17: Tabla de Ventajas y desventajas de un microcontrolador MCU y sus variantes.

La tabla superior nos muestra las ventajas y desventajas de los diseños controlados por microcontroladores en comparación con soluciones independientes. Una solución integrada permite menor tiempo de manufacturación y una notable reducción de costos, cuando sus especificaciones cumplen los requisitos de la aplicación de destino.

Con el fin de ayudar a los diseñadores a optimizar el rendimiento y reducir el tiempo de desarrollo, muchos proveedores de semiconductores ofrecen bibliotecas de firmware y microcontroladores con periféricos específicos, que mejoran el desarrollo de soluciones para el control de motores BLDC. La apropiada selección del sistema del diseño de activación de un motor BLDC permite obtener el máximo rendimiento del sistema, al mismo tiempo que permite controlar los costos de manera más eficiente.

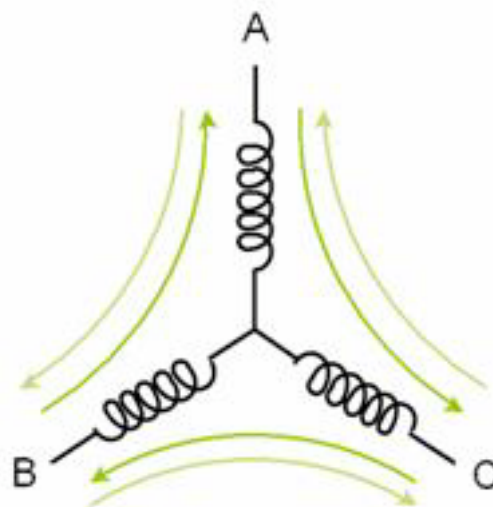
## 5.2 Métodos de conmutación de motores sin escobillas

Los métodos de control para los motores con sensores se clasifican según el algoritmo de control que se utilice. Los más usados son los siguientes que repasaremos a continuación en orden creciente de eficiencia y complejidad:

- Conmutación trapezoidal o six steps
- Conmutación sinusoidal
- Control vectorial o Field Oriented Control

### 5.2.1 Conmutación trapezoidal o six steps

Es el método más simple de control de los motores sin escobillas. En este esquema se controla la corriente que circula por los terminales del motor, excitando un par simultáneamente y manteniendo el tercer terminal desconectado. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar hasta completar las seis combinaciones posibles. Las 6 direcciones de las corrientes se muestran en la figura 1.1.



*Figura 18: Esquema de los seis posibles caminos de circulación de corriente en el control trapezoidal*

Este esquema puede usarse en motores con sensores de efecto Hall, como en motores sin sensores, donde se usa para conocer la posición del rotor el censado del back EMF en la bobina que está sin excitar.

Tiene como ventajas su sencillez y facilidad de implementación por lo cual es el método más usado en motores pequeños. Pese a esto, tiene un problema inherente a la conmutación del vector de corrientes que es un rizado en el torque de salida. En aplicaciones donde se requieren fuerzas uniformes o bajas velocidades, esto puede llegar a ser inconveniente. En la figura 1.2. Se muestran las corrientes por cada una de las fases, la secuencia de conmutación y el torque.

### 5.2.2 Conmutación sinusoidal

La conmutación sinusoidal es vista como un control más avanzado y exacto que el trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente. Esta continuidad se consigue aplicando simultáneamente tres corrientes sinusoidales desfasadas  $120^\circ$  a los tres bobinados del motor.

La fase de estas corrientes se escoge de forma que el vector de corrientes resultante siempre esté en cuadratura con la orientación del rotor y tenga un valor constante. Como consecuencia de este procedimiento se obtiene un par más preciso y sin el rizado típico de la conmutación trapezoidal. No obstante, para poder generar dicha modulación sinusoidal es necesaria una medida precisa de la posición del rotor, que difícilmente se logra con sensores de efecto Hall, por lo cual se requiere de un encoder absoluto de alta resolución.

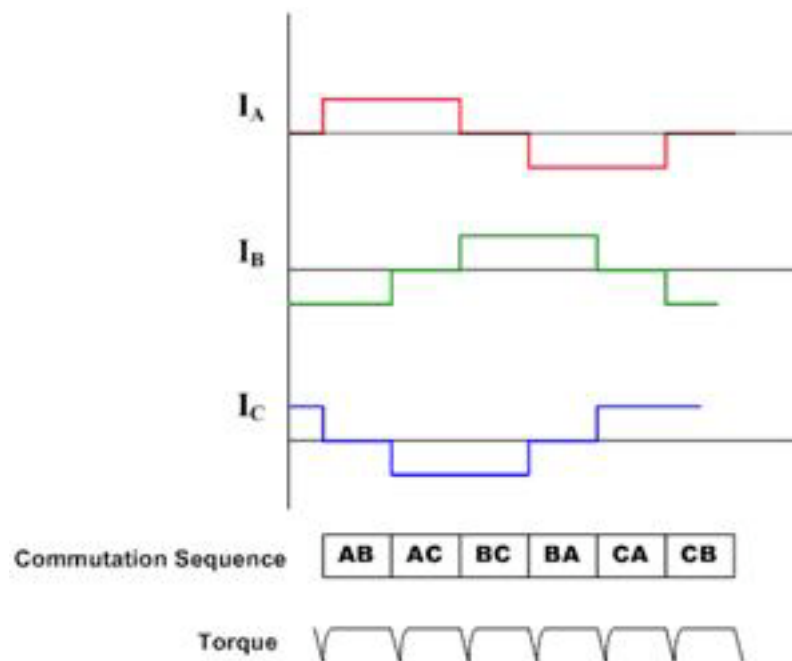


Figura 19: Corrientes en las bobinas y torque del motor

A bajas velocidades este método de control presenta el mejor desempeño en eficiencia y suavidad del torque, sin embargo a altas frecuencias no responde tan

bien debido a la necesidad de procesar señales sinusoidales de frecuencias altas y a que los controladores PI usados para generar estas señales tienen una respuesta limitada en ganancia y frecuencia. Cuando la frecuencia es suficientemente alta, la eficiencia decrece y el error aumenta, tendiendo a un punto de cero torque.

### 5.2.3 Control vectorial o Field Oriented Control

El problema principal que presenta la conmutación sinusoidal es que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo. Al aumentar la velocidad del motor, y por tanto la frecuencia de las corrientes, empiezan a aparecer problemas. El control vectorial o Field Oriented Control (FOC) soluciona el problema controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q (Direct-Quadrature). Dicho espacio de referencia está normalmente alineado con el rotor de forma que permite que el control del flujo y del par del motor se realice de forma independiente. La componente directa permite controlar el flujo y la componente en cuadratura el par.

Para este fin se requiere no solamente una muy buena medición de la orientación del rotor, sino un tratamiento matemático previo de las señales para transformarlas del marco trifásico estático de los bobinados en el estator al marco rotacional d-q del rotor. Este es el control que presenta mejor respuesta en todos los rangos de velocidad pero resulta ser el más costoso de implementar, lo cual lo hace inadecuado para toda aplicación en la que no sea estrictamente necesario.

## 6 Presentación del prototipo

El prototipo tiene como parte principal el objeto que será artífice de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. El motor elegido para dicho sistema es de tipo **DC brushless outrunner** que explicaremos brevemente sus características particulares más adelante.

A su vez se ha acoplado a su eje de giro (rotor) un volante de inercia, obtenido de un disco duro, de cuya masa especificaremos más adelante, el cual nos facilitará y prolongará como demostraremos, nuestra energía cinética almacenada para después poder utilizarla en forma de energía eléctrica.

Para un correcto control del motor utilizaremos un **ESC (Electronic Speed Control)**. El ESC manejará la cantidad de corriente que saldrá de la batería LiPo para alimentar al motor. A su vez, del ESC, partirá la señal que conectaremos al Arduino Mega, con el cual a través de un código de programación de la propia herramienta, **podremos controlar de manera sencilla la velocidad del motor a través de pulsos**.

Se diseñó un circuito para la **lectura digital del voltaje** de las celdas de la batería LiPo a través de una placa Arduino ATmega2560, y así en efecto no pisar el código creado inicialmente para el control del motor. Lo que haría este circuito es trabajar para **transformar la señal analógica de salida de la LiPo en una señal digital**. Esto es fundamental para conseguir leer a través de Matlab la tensión a la que se encuentra la batería en todo momento. Con esto se hallarán las gráficas relativas para el estudio de eficiencia y comportamiento del motor.

Con esto se buscan los siguientes aspectos a considerar:

- Relación tiempo/voltaje
- Medición del voltaje con precisión (+/- 0.25%)
- Medición de la corriente de la batería (+/- 1%)
- Variación de la carga aplicada a la batería

Al hallar la señal de voltaje, **la frecuencia de esa señal brindará el comportamiento de la misma, como número de ciclos por segundo**.

### 6.1 Motor

La palabra brushless se puede traducir como "**sin escobillas**", las escobillas son los elementos que hacen contacto en el colector de un motor común como explicamos anteriormente. En los motores de DC más pequeños, son de una aleación de cobre y en motores más grandes son de un compuesto a base de carbón.

Estos motores carecen de colector y escobillas o carbones. **En vez de funcionar en DC funcionan en AC (corriente alterna)**, la mayoría se alimentan con una señal trifásica, esta **señal idealmente debería ser sinusoidal, pero en la práctica son pulsos**, haciendo que la señal sea una continua pulsante o bien una continua con mucho componente de AC. Sin embargo se los clasifica como DC porque al igual que los motores comunes tienen imanes permanentes.

En este tipo de motores (outrunners) los **bobinados de cobre se disponen en la parte interior central**, mientras que los imanes están situados en una campana exterior que rodea al bobinado y a la que se conecta el eje, cuando la campana gira lo hace también el eje, estos motores producen un menor número de revoluciones, sin embargo la campana al actuar como un volante de inercia, les dota de un mayor par por lo que dan más potencia sin necesidad del empleo de una reductora, esto les hace ser **más ligeros, silenciosos y económicos**.



*Figura 20: Imagen del motor BLDC utilizado para las pruebas en campo sin el volante de inercia acoplado*

## 6.2 Volante de Inercia

De manera muy sencilla se utilizó un volante de inercia, **reutilizado de un antiguo motor de un disco duro**. Se halló la forma de acoplarlo al BLDC mediante una tuerca y un eje con rosca, los dos componentes quedando perfectamente acoplados.

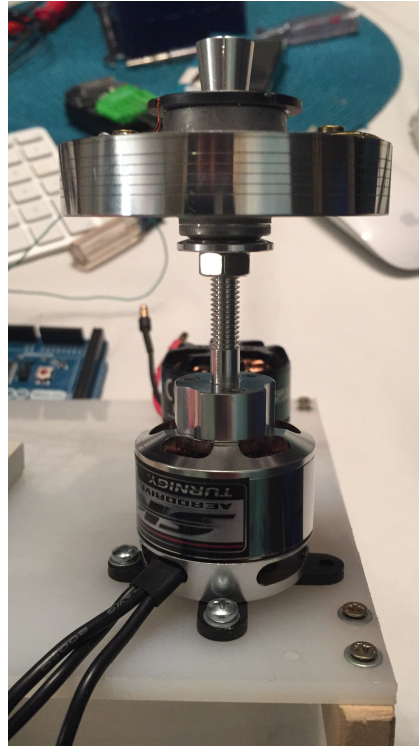


Figura 21: Imagen del volante de inercia acoplado al BLDC

Para hacernos una idea rápida del potencial de este sistema, se hizo una prueba muy sencilla pero muy útil. Se activó el motor a su máximo régimen de giro sin el volante de inercia, dejando de alimentarlo acto y seguido para ver el tiempo de su parada. **El tiempo de parada sin el volante de inercia fue de menos de 2 segundos (1,92 segundos).**

Después se hizo el mismo ensayo con el volante de inercia y se obtuvo un resultado muy interesante puesto que tardó **más de 8 segundos en parar por completo (8,23 segundos)**. Más adelante se hará un estudio profundizado del voltaje y frecuencia para entender mejor cuáles serán los márgenes de potencia que tendremos para utilizar nuestro BLDC como generador de corriente.

El volante de inercia como se ha descrito anteriormente tiene forma circular con **60 mm de diámetro y 12 milímetros de anchura** por lo que el cálculo de la inercia asociada al giro del mismo será:

$$I_{\text{volante}} = \frac{1}{2} m(\text{volante}) * R^2(\text{volante})$$

La masa del volante se ha medido y hallado y es igual a 84 g. De aquí sacaremos la inercia del volante que después la sumaremos a la inercia del motor para tener un conocimiento de la inercia total del sistema y por lo tanto de su energía cinética potencial.

$$I_{\text{volante}} = \frac{1}{2} 0.084 * 0.03^2(\text{volante}) = 3.78 * 10^{-5} \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

Ahora pasaremos al cálculo de la inercia del rotor del motor y la inercia total del sistema:

$$I_{rotor} = \frac{1}{2} m(\text{rotor}) * (R^2(\text{exterior}) + R^2(\text{interior}))$$

$$I_{rotor} = \frac{1}{2} 0.068 * (0.042^2 + 0.04^2) = 1.143 * 10^{-4} [\text{Kg} * \text{m}^2]$$

$$I_{volante} + I_{rotor} = 1.521 * 10^{-4} [\text{Kg} * \text{m}^2]$$

### 6.3 Controlador

Un variador de velocidad (ESC) está compuesto por un circuito con varios componentes. El propósito del variador es variar la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro.

Independiente del tipo de motor eléctrico al que conectemos el variador, **el ESC interpreta información de control**. Antiguamente, cuando la tecnología estaba limitada, los variadores eran mecánicos y actuaban a través de servos. En las nuevas versiones, **los ESC varían el ratio de cambio de una red de transistores de efecto de cambio (FET)**.

La variación en los cambios de estos transistores es lo que causa ese sonido característico de los motores eléctricos. **Este grupo de transistores hace posible un control más suave y preciso de la velocidad de giro de los motores**. Gracias a esto también se consigue una mejora en la eficiencia con respecto a los mencionados variadores mecánicos.

La mayoría de los ESC **incorporan un sistema BEC**, el cual, hace posible **regular un voltaje estable para poder hacer funcionar el receptor y los servos**. Esto elimina la necesidad de llevar una batería extra para alimentar estos componentes.

BEC voltage: 6 Volts  
BEC load: 3 Amps

Battery Voltage	Linear BEC			Switching BEC		
	Battery Current	Wasted Power	Efficiency	Battery Current	Wasted Power	Efficiency
2s lipo (7.4v)	3A	4.2w	81.0%	2.797	2.7w	~85%
3s lipo (11.1v)	3A	15.3w	54.0%	1.865	2.7w	~85%
4s lipo (14.8v)	3A	26.4w	44.4%	1.399	2.7w	~85%
5s lipo (18.5v)	3A	37.5w	32.0%	1.119	2.7w	~85%
6s lipo (22.2v)	3A	48.6w	27.0%	0.954	2.7w	~85%

Figura 22: Tabla de eficiencia del BEC a diferentes voltajes de entrada



### 6.3.1 Variadores Lineales (BEC)

Los variadores lineales utilizan resistores para bajar el voltaje que proporciona nuestra batería Lipo. Esto hace posible que nuestro receptor funcione a 5 voltios sin que se queme por el alto voltaje de la batería. A medida que la batería tiene más celdas, o voltios, y el receptor consume más, se genera calor al pasar la corriente por el resistor. **Si la corriente es alta, el resistor se calentará dañando el BEC.**

### 6.3.2 Variadores BEC cambiantes

**Este tipo de variadores cambia el voltaje con una alta frecuencia para bajarlo de manera más efectiva.** De esta manera, se consigue reducir el voltaje sin generar calor o malgasto de energía. Alguno de estos variadores ofrecen la posibilidad de regular la corriente que le llega a nuestro receptor, 5 o 6v.

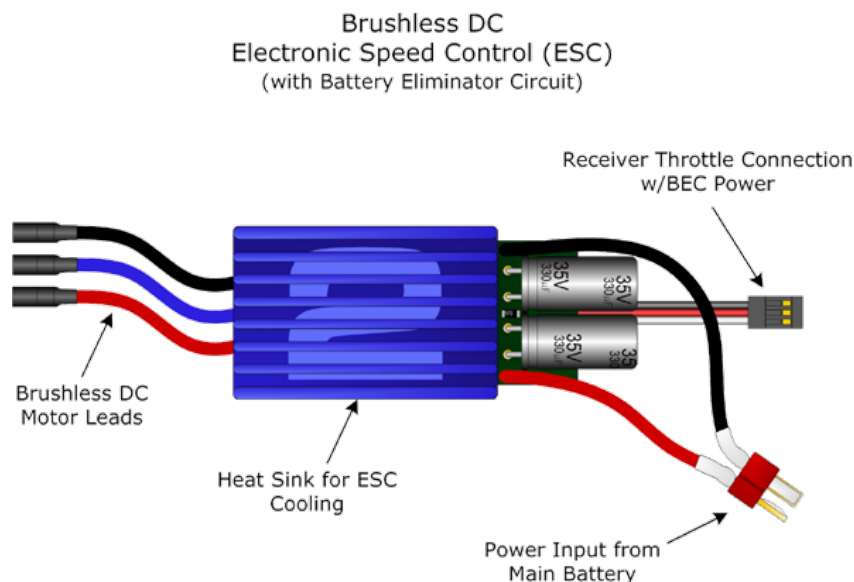


Figura 23: Figura de componentes del ESC

### 6.3.3 Control a través de un ESC

Los variadores en general, son controladores de Modulación por Ancho de Puntos (PWM) para controlar motores eléctricos. El receptor de nuestro prototipo, **manda una señal PWM al ESC con variaciones de 1 a 2 milisegundos. En la primera (1 ms) el motor estará parado, a 1.5 milisegundos el motor funcionará a la mitad de su potencia y a 2ms el motor funcionará al 100%.** Una manera fácil de identificarlos es que los variadores para motores con escobillas llevan dos cables, mientras que los otros llevan 3.

**Los variadores para motores brushless crean una corriente alterna trifásica a partir de corriente continua proveniente de la batería.** Es aquí donde entra en escena los 3 cables que llevan los variadores para motores sin escobillas. **Uno**

**de los polos genera un pequeño voltaje proporcional a la velocidad de giro del motor** conocido como fuerza electromotriz. **Este voltaje le sirve al ESC para determinar como de rápido y en qué dirección gira el motor** en cualquier momento. Con esta información el ESC es capaz de averiguar como manda la corriente a los electroimanes del motor para que este gire.

#### 6.3.4 Elección correcta

Los variadores están categorizados en función de la máxima corriente que pueden soportar. **A mayor corriente que aguante un ESC mayor será su precio.** Lo recomendable a la hora de elegir nuestro variador es optar por uno que se encuentre por encima de la demanda del motor de nuestro prototipo. Una corriente alta podrá dañar el ESC en pleno funcionamiento. Así mismo, también tendremos que tener en cuenta la LiPo que vamos a usar con el variador. Es importante fijarse en el voltaje de la batería que hemos elegido para nuestro prototipo.

#### 6.4 Arduino Mega ADK

Se utilizó para el prototipo una placa Arduino Mega ADK para tener un dominio en el control del motor, de manera que pudiéramos facilitar las pruebas y poder demostrar así su efectividad. Con dicho control también conseguimos a través de **un código Matlab dar las órdenes consecuentes para que la batería mecánica se comporte como acumulador de energía o bien actúe como batería mecánica y así pueda restituir la energía almacenada** en forma de energía mecánica, en forma de energía eléctrica gracias a nuestro motor outrunner.

##### 6.4.1 Aspectos

El Arduino MEGA ADK es una placa microcontroladora basada en el ATmega2560. Tiene una interfaz de host USB para conectarse con teléfonos basados en Android. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio.

Esta placa es similar a la Mega 2560 y Uno, que cuentan con un ATmega8U2 programado como un convertidor USB a serie. Existen 2 versiones que se hicieron recientemente:

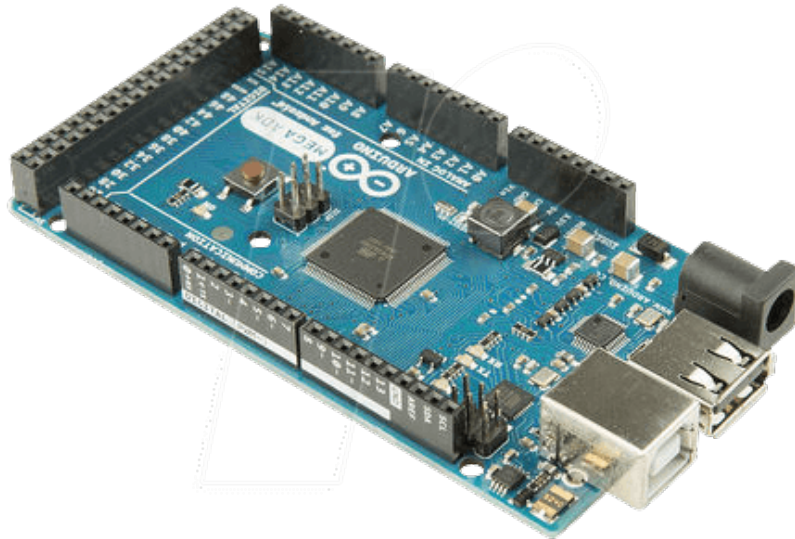


Figura 24: Fotografía de la placa utilizada para el prototipo, Arduino Mega ADK

#### 6.4.2 Características técnicas

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
USB Host Chip	MAX3421E
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

##### *Alimentación de la Placa:*

El Arduino MEGA ADK puede alimentarse a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente.

**La alimentación externa (no USB) puede venir desde un adaptador AC-DC o una batería.** El adaptador puede conectarse enchufando un conector positivo de centro de 2,1 mm en el conector de alimentación de la tarjeta. Las derivaciones de una batería se pueden insertar en los pines Gnd (tierra) y Vin (Voltaje de entrada) del conector POWER.

Debido a que el MEGA ADK es un host USB, el teléfono que conectemos intentará extraer energía de él cuando tenga que cargarse. Cuando el ADK es accionado sobre un USB, los 500mA estarán disponibles para el teléfono y el regulador de energía externo. La placa puede suministrar hasta 1500mA. 750mA están disponibles para el teléfono y la tarjeta MEGA ADK. Los 750mA adicionales se asignan para cualquier actuador y sensor conectado al tablero.

Los pines de alimentación son los siguientes:

*VIN*: El voltaje de entrada a la tarjeta Arduino cuando se utiliza una fuente de alimentación externa (a diferencia de 5 voltios de la conexión USB u otra fuente de alimentación regulada). Se puede suministrar voltaje a través de este pin.

*5V*: Este pin emite 5V regulados con el regulador de la placa. La placa se puede alimentar desde el conector de alimentación de CC (7 – 12V), el conector USB (5V) o el pin VIN de la placa (7-12V). El suministro de voltaje a través de los pines de 5V o 3.3V evita el regulador, y puede dañar su placa. El fabricante no aconseja su uso.

*3.3V*: Una fuente de 3.3 voltios generada por el regulador de a bordo. El consumo máximo de corriente es de 50 mA.

*GND*: Puesta a tierra.

*IOREF*: Este pin de la tarjeta Arduino proporciona la referencia de tensión con la que opera el microcontrolador. Un blindaje correctamente configurado puede leer el voltaje de la patilla IOREF y seleccionar la fuente de alimentación apropiada o habilitar los traductores de tensión en las salidas para trabajar con los 5V o 3.3V.

#### 6.4.3 Programación

El Arduino MEGA ADK **se programa a través del software Arduino**. El circuito de impresión viene pre-grabado con un gestor de arranque (el mismo que en el Mega 2560) que le permite cargar un nuevo código sin el uso de un programador de hardware externo.

#### 6.4.4 Automatic (Software) Reset

En lugar de requerir una pulsación física del botón de reinicio antes de una carga, el Arduino MEGA ADK está diseñado de tal forma que **permite su reinicio mediante software**, el cual se ejecuta desde un ordenador conectado.

Cuando se confirma la orden de control, la orden de reinicio se cae el tiempo suficiente para restablecer el chip. El software Arduino utiliza esta función para poder cargar código simplemente pulsando el botón de carga en el entorno Arduino. Esto significa que el gestor de arranque puede tener un tiempo de espera más corto.

Esta configuración tiene otras implicaciones. Cuando el MEGA ADK está conectado a un ordenador que ejecuta Mac OS X o Linux, se restablece cada vez que se realiza una conexión desde el software (a través de USB). Durante el siguiente medio segundo aproximadamente, el cargador de arranque se está ejecutando en el MEGA ADK. Mientras está programado para ignorar datos mal formados (es decir, cualquier cosa además de una carga de nuevo código), interceptará los primeros pocos bytes de datos enviados a la placa después de que se abra una conexión.

Si un boceto que se ejecuta en la placa recibe una configuración única u otros datos cuando se inicia por primera vez, habrá que asegurarse de que el software con el que se comunica, espera un segundo después de abrir la conexión y antes de enviar estos datos.

El MEGA ADK tiene una opción interesante puesto que se puede cortar la conexión y deshabilitar el restablecimiento automático. También se puede desactivar el restablecimiento automático conectando una resistencia de 110 ohmios de 5V a la línea de reinicio.

#### 6.4.5 Protección de sobreintensidad USB

El Arduino MEGA ADK tiene un **fusible reiniciable que protege los puertos USB de su computadora de cortocircuitos y de sobrecargas**. Aunque la mayoría de las computadoras proporcionan su propia protección interna, el fusible proporciona una capa adicional de protección. Si se aplican más de 500 mA al puerto USB, el fusible romperá automáticamente la conexión hasta que se quite el cortocircuito o la sobrecarga.

#### 6.4.6 Compatibilidad

El MEGA ADK está diseñado para ser compatible con la mayoría de placas diseñadas para el Uno, Diecimila o Duemilanove. Los pines digitales 0 a 13 (y los pines AREF y GND adyacentes), las entradas analógicas 0 a 5, el encabezado de alimentación y la cabecera ICSP se encuentran en ubicaciones equivalentes. Además, el UART principal (puerto serie) se encuentra en los mismos pines (0 y 1), al igual que las interrupciones externas 0 y 1 (pines 2 y 3, respectivamente).

#### 6.4.7 Código Arduino para el control del BLDC

El código mediante Arduino para el control de la velocidad del motor se creó **a partir de pulsos que modulan y controlan el voltaje que se debe entregar al motor**. En la siguiente imagen se puede ver un diagrama de flujos con su comportamiento y así ver de manera funcional las órdenes que se le impone a la herramienta de uso.

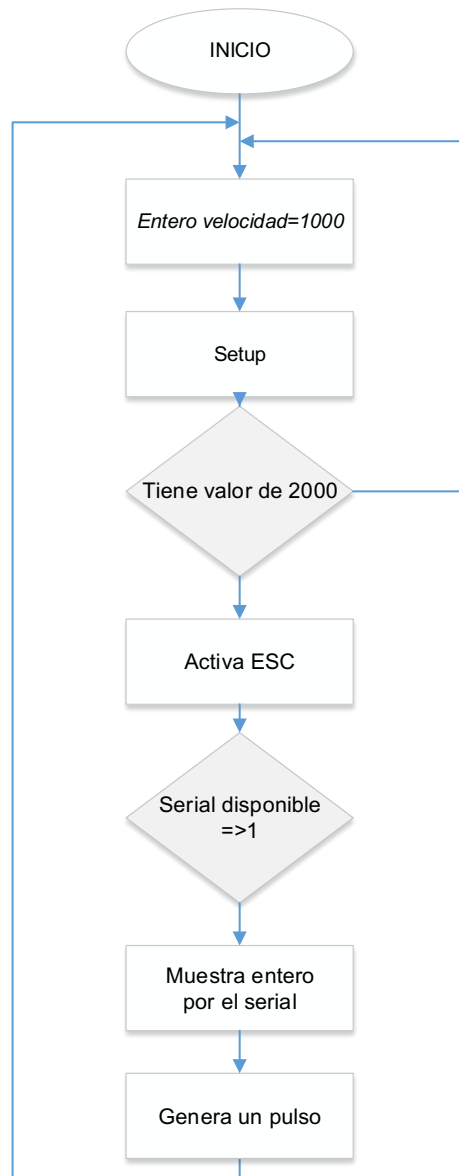


Figura 25: Diagrama de flujo del generador de pulsos

De forma específica se muestra el **código utilizado en Arduino para el control más preciso posible del motor**. Se generó en un primer momento una amplitud de pulso para su manejo, seguido de la posición de la señal del ESC en la placa. Después se configuró un modelado de control para según el pulso tecleado por el usuario recibir un voltaje mayor o menor para aumentar o disminuir su régimen de giro con respecto al tiempo.

Abajo podemos observar el código utilizado. El lenguaje es bastante simple e intuitivo:

```
#include<Servo.h>

Servo ESC; //Crear un objeto de clase servo

int vel = 1000; //amplitud del pulso

void setup()
{
  //Asignar un pin al ESC
  ESC.attach(9);

  //Activar el ESC
  ESC.writeMicroseconds(1000); //1000 = 1ms

  delay(5000); //Esperar 5 segundos para hacer la 51aterías51n

  //Iniciar puerto serial
  Serial.begin(9600);
  Serial.setTimeout(10);
}

void loop()
{
  if(Serial.available() >= 1)
  {
    vel = Serial.parseInt(); //Leer un entero por serial
    if(vel != 0)
    {
      ESC.writeMicroseconds(vel); //Generar un pulso con el numero recibido
    }
  }
}
```

#### 6.4.8 Lectura digital de la evolución voltaje-batería con Matlab

En este apartado se muestra el código a través de Matlab, utilizado para la lectura en línea del voltaje obtenido a través de las salidas de las celdas de la batería:

```
clear all
clc
%clear the screen
```

```

delete(instrfind({'Port'},{'/dev/tty.usbmodem641'}));
%create the object(serie)
s = serial('/dev/tty.usbmodem641','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
%abrir puerto
fopen(s);
% parameters.
tmax = 10; % tiempo de captura en s
rate = 33; % resultado experimental (comprobar)
% figure
f = figure('Name','Captura');
a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[0 5.1]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',2);
l2 = line(nan,nan,'Color','b','LineWidth',2);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
title('Captura de voltaje en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on
% initialize
v1 = zeros(1,tmax*rate); v2 = zeros(1,tmax*rate); i = 1;
t = 0;
tic
while t<tmax
t = toc;
% read the port
a = fscanf(s,'%f,%f'); v1(i)=a(1)*5/1024; v2(i)=a(2)*5/1024;
% dibujar en la figura
x = linspace(0,i/rate,i); set(l1,'YData',v1(1:i),'XData',x);
set(l2,'YData',v2(1:i),'XData',x); drawnow
% seguir
i = i+1;
end
% results
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t); %% clean the screen.
fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

## 6.5 Arduino ATmega2560

Esta tarjeta, como hemos descrito anteriormente, **la utilizaremos únicamente para poder transformar la señal que emite nuestra batería de forma analógica en forma digital**. Con esto podremos leer el voltaje con respecto al tiempo de una celda de la batería, con lo cual podremos empezar a estudiar cuanta energía se consume en la batería y por lo tanto la energía que se utiliza para su arranque.



## 6.6 Batería LiPo

Aunque se trata de eliminar las baterías electroquímicas debido a su elevado factor contaminante a la hora de deshacernos de ellas, vamos a dedicarle buen tiempo a su estudio en este apartado. Motivo de este estudio se debe a que por un lado **nos permitirá actuar como fuente de alimentación** y por lo tanto arrancar y elegir el régimen de giro de nuestro BLDC. Por otro lado **gracias a las señales de salida por celda que posee, podremos enviar dicha señal transformándola de analógica a digital y así tomar lectura del voltaje** consumido y generado a la vez que podremos analizar también su comportamiento a través de la frecuencia.

### 6.6.1 Aspectos generales

Las baterías LiPo (abreviatura de **Litio y polímero**) son un tipo de batería recargables que suelen utilizar los sistemas eléctricos de radiocontrol, especialmente los aviones y helicópteros. Algunos dicen que estas baterías son la razón principal por las que el vuelo eléctrico es ahora una opción muy viable respecto a los modelos que funcionan con combustible.

Cuando comparamos con las baterías de Ni CD/SIMM, las baterías LiPo tienen 3 cosas importantes que hacen a estas baterías la elección perfecta (sobre todo en el campo del radiocontrol):

- Las baterías LiPo son ligeras y se pueden hacer de casi cualquier forma y tamaño.
- Las baterías Lipo tienen gran capacidad lo que significa que tienen un montón de energía en un tamaño reducido.
- Las baterías LiPo tiene una tasa de descarga alta para alimentar los sistemas eléctricos más exigentes.

También existen algunos problemas con las baterías LiPo de radiocontrol:

- Problemas de seguridad a causa del electrolito volátil utiliza exclusivamente en las LiPo pueden incendiarse o explotar.
- Las baterías LiPo de radiocontrol requieren un cuidado único y adecuado para que duren mucho tiempo más que cualquier otra tecnología. La carga, la descarga y almacenamiento afecta a la esperanza de vida de la batería.

### 6.6.2 Voltaje o clasificación "S"

A diferencia de las baterías NiCd o NiHm que contienen celdas de 1.2 voltios, las baterías LiPo tienen celdas de **3,7 voltios** y **4.2 voltios cuando están totalmente cargadas**. El beneficio aquí es que disponemos de menos celdas para crear una batería.

En los modelos más pequeños de radiocontrol las baterías LiPo contienen al menos dos celdas conectadas en serie para proporcionar voltajes más altos. Para los

modelos RC de mayor tamaño el número de celdas puede ser 6 celdas y aún más para elementos más grandes o aplicaciones de alta tensión.

Aquí una lista de voltajes de carga de las baterías LiPo con recuento de celdas:

- 3.7 voltaje de batería = 1 celda x 3.7 voltaje (1S)
- 7.4 voltaje de batería = 2 celdas x 3.7 voltaje (2S)
- 11.1 voltaje de batería = 3 celdas x 3.7 voltaje (3S)
- 14.8 voltaje de batería = 4 celdas x 3.7 voltaje (4S)
- 18.5 voltaje de batería = 5 celdas x 3.7 voltaje (5S)
- 22.2 voltaje de batería = 6 celdas x 3.7 voltaje (6S)

El número entre paréntesis, es una manera del fabricante de indicar el número de celdas conectadas en serie “S” que contiene la batería.

Las baterías también se pueden conectar en paralelo para aumentar la capacidad. Esto se indica mediante un número seguido de una “P”. **Ejemplo 3S2P indica dos baterías conectadas en serie de tres celdas.**

#### 6.6.3 Clasificación por capacidad

**La capacidad indica cuánta energía puede mantener la batería y se indica en miliamperios (mAh).** Esta es una manera de indicar la cantidad de carga medida en miliamperios que se pueden poner en la batería durante 1 hora para que la batería se descargue completamente.

Por ejemplo las baterías LiPo que tienen 1000 mAh serían completamente descargadas en una hora con una carga de 1000 miliamperios colocada en ellas. Si ésta misma batería tenía una carga de 500 miliamperios tomaría 2 horas para descargarla.

Lo principal es que si se quiere más tiempo de funcionamiento se necesita aumentar la capacidad de la batería. A diferencia del voltaje, la capacidad puede cambiar todo para dar más o menos tiempo de uso. Por supuesto con unas restricciones de tamaño y peso la capacidad de la batería está limitada. Cuanta mayor capacidad tiene la batería mayor será su peso y su tamaño.

#### 6.6.4 Tasa de descarga o “C”

Esta es probablemente la característica más sobrevalorada y menos comprendida dentro de la clasificación de las baterías. **La tasa de descarga es simplemente la rapidez con que una batería puede ser descargada de forma segura.** Cuanto más rápido los iones fluyen del ánodo al cátodo indicará la velocidad de la descarga. En el mundo de las baterías LiPo la clasificación se denomina “C”.

**Una batería con una tasa de descarga de 10C se descarga a un ritmo de 10 más que la capacidad de la batería, 15C = 15 veces, 20C = 20 veces, y así sucesivamente.**

### 6.6.5 Voltaje y corriente máximo de carga

Una celda de batería LiPo de 3.7 voltios está cargada al **100% cuando alcanza los 4.2 voltios**. Cargarla de más puede destruir las celdas de la batería y posiblemente prenda fuego. Es muy importante tener esto siempre en cuenta. Un cargador inteligente se detendrá cuando la batería alcanza los 4.2 voltios por celda. Un cargador inteligente equilibrará la carga por cada celda.

Es muy importante utilizar un cargador específico para las baterías LiPo y seleccionar el voltaje correcto o seleccionar el número de celdas al cargar la batería. Si se tiene una batería de 2 celdas (2S) habría que seleccionar 7.2 voltios o 2 celdas. Si se tiene seleccionado 11.1V (una batería de 3S) por error y se trata de cargar una batería de 2S la batería puede ser dañada.

La mayoría de los cargadores buenos de baterías LiPo utilizan un método de carga de **corriente constante / voltaje constante** (cc/cv). Lo que significa que la corriente constante se aplica a la batería durante la primera parte del ciclo de carga. A medida que la tensión de la batería se acerca a la tensión de carga al 100%, el cargador reducirá automáticamente la corriente de carga y luego aplicará una tensión constante. **El cargador dejará de cargar cuando el 100% del voltaje de carga de la batería iguale la constante de voltaje configurada (4.2 voltios por celda)**. Pasarse del voltaje máximo por celda acorta la vida de la batería.

## 7 Metodología de pruebas

### 7.1 Obtención de los parámetros del motor

En este apartado se establecen los parámetros del motor para un conocimiento de este más exhaustivo. Como hemos descrito anteriormente se trata de un motor con imanes permanentes en el rotor. Estos son llamados más comúnmente **outrunners**, puesto que los devanados se encuentran en el estator.

Tienen un fácil control y generan un campo magnético constante lo cual nos servirá para hacerlo funcionar tanto como motor como generador de corriente. Para hallar los valores del motor se ha caracterizado un motor sin escobillas de imanes permanentes de la marca **Turnigy**. El modelo y características son las siguientes:

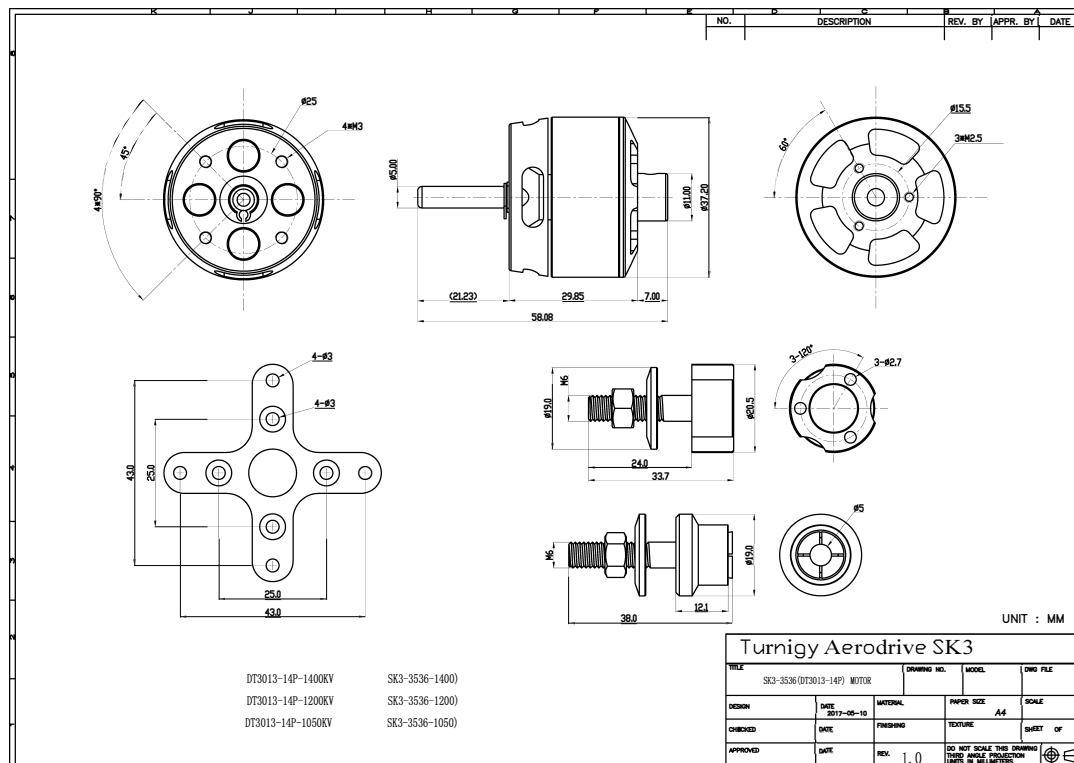
<i>Turnigy Aerodrive SK3 3536-1050 kV Brushless Outrunner Motor</i>	
Kv (rpm/V)	1050
Weight (g)	110
Max Current (A)	34
Resistance (mh)	39
Max Voltaje (V)	15
Power (W)	505

Aquí podemos observar algunas pruebas mostradas por el fabricante para hacernos una idea de la potencia y voltaje utilizado según la batería. Aquí vemos que se ha utilizado una batería diferente a la nuestra, pero sirve para hacerse una idea del nivel de potencia al que podemos llegar a diferentes regímenes.

Motor:	Turnigy Aerodrive SK3 - 3536-1050kv Outrunner Battery: Zippy Flightmax 2100mAh 3S 35C											
I <sub>0</sub> (A)	I =	0.3										
Prop	9 x 4.7				10 x 4.7				12 x 6			
U <sub>bat</sub> (V)	11.87				11.76				11.45			
Throttle (%)	30	50	70	100	30	50	70	100	30	50	70	100
P (W)	22.00	54.40	126.00	197.00	21.50	67.50	210.00	280.00	23.00	92.00	300.00	400.00
I (A)	1.90	4.60	13.30	18.00	2.00	5.80	20.10	27.10	2.00	8.30	29.60	39.30
U <sub>min</sub> (V)	11.79	11.63	11.26	11.04	11.65	11.49	10.87	10.64	11.38	11.20	10.30	10.05
Thrust (gr)	150	350	725	965	173	470	1135	1340	205	625	1300	1470

Figura 26: Características del motor según la batería y potencia utilizada

En la siguiente imagen apreciamos un desglose de las partes del motor que hemos utilizado para el diseño de la batería mecánica:



*Figura 27: Plano técnico del BLDC Turnigy Aerodrive.*

### 7.1.1 Pruebas y respuesta del motor BLDC

En este apartado hablaremos de la primera conexión que se realizó para la puesta en marcha del motor. En la siguiente imagen (Figura 28) podemos ver como se hizo la conexión inicial para **arrancar el motor y poder variar su velocidad mediante pulsos a través de Arduino**.

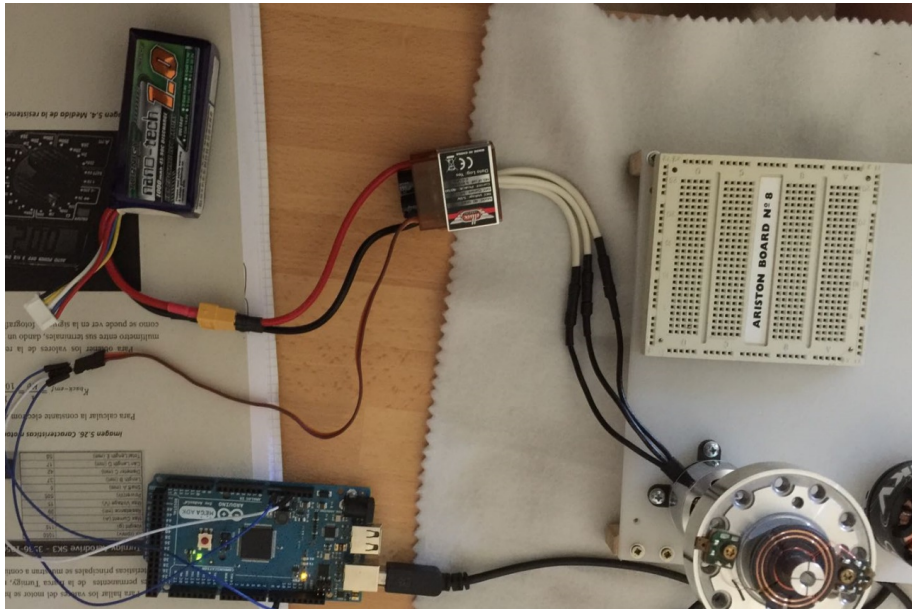


Figura 28: Conexión al motor.

Como hemos explicado en apartados anteriores, la placa Arduino se encargará en primer momento de hacernos de traductor, para así poder llevar el motor a las revoluciones deseadas.

A través de un código simple e intuitivo conseguimos manejar el motor y darle las órdenes a través de pulsos para su variación de giro en el tiempo. Se observa rápidamente como el volante de inercia ayuda a conservar la energía en el tiempo después de su detención. Esta observación se puede apreciar a primera vista dado que en un primer momento se ha testado el motor sin volante de inercia y este tiende a conservar su energía en el tiempo por un valor muy inferior.

### 7.1.2 Tasa de descarga de la batería LiPo

Desde el punto de vista teórico, la tasa de descarga de las baterías viene dada por la ecuación siguiente:

$$K = i^p t$$

donde  $p$  es la constante de Peukert,  $i$  es la corriente y  $K$  es una constante de proporcionalidad. En el caso de las baterías LiPo, la constante de Peukert es aproximadamente 1,05 (Andrea, 2010). En el presente trabajo se ha analizado la descarga de una batería LiPo con la presencia de un motor bidireccional que atenúa su descarga.

En este modelo de descarga, se parte de condiciones a temperatura ambiente, para evitar la variabilidad en la descarga dado que en este tipo de baterías es estrictamente dependiente de la temperatura.

En el siguiente esquema podremos contemplar la distribución de voltaje en las celdas de la batería que estamos utilizando. Recordemos que será fundamental su

estudio puesto que nos servirá de medidor, para hallar realmente la capacidad de almacenaje de nuestro volante de inercia.

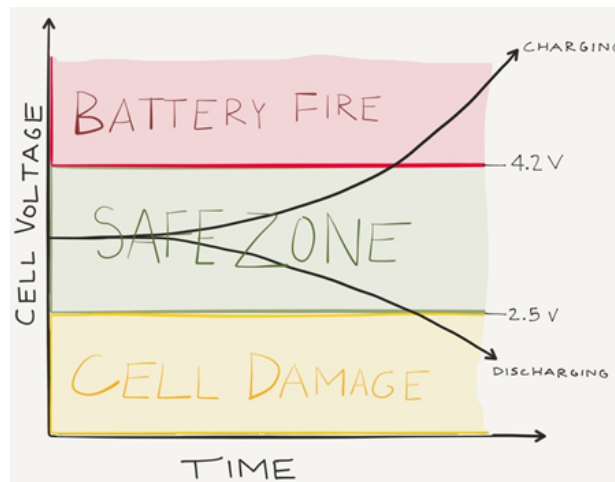


Figura 29: Distribución del voltaje de una celda

Se intentará siempre estar en los márgenes seguros para no dañar la batería, puesto que **tanto una descarga excesiva por debajo de los 2,5 V, o una carga excesiva por encima de los 4,2 V podría dañar y deshabilitar nuestra LiPo.**

### 7.1.3 Esquema funcional

El esquema completo para llevar a cabo la lectura del voltaje, se ha obtenido a través de las salidas analógicas de la LiPo que se utilizan para su propia carga. Se utilizó una placa Arduino ATmega2560 como convertidor. Con esto se han conectado las salidas analógicas de la LiPo a la placa Arduino y de ahí se conectó al ordenador para su conversión pasando por un divisor de tensión.

Con este circuito se consiguió de una manera simple **poder convertir la señal analógica de salida de la batería, en una señal digital para poder obtener una lectura a través de Matlab del voltaje y frecuencia del consumo** y pérdida de la LiPo. Con esto no solo podemos registrar las señales en línea, también podremos tratarlas posteriormente mediante Matlab.

En el siguiente esquema (figura 30) podremos analizar de manera gráfica como será nuestra conexión para la medición posterior del voltaje.

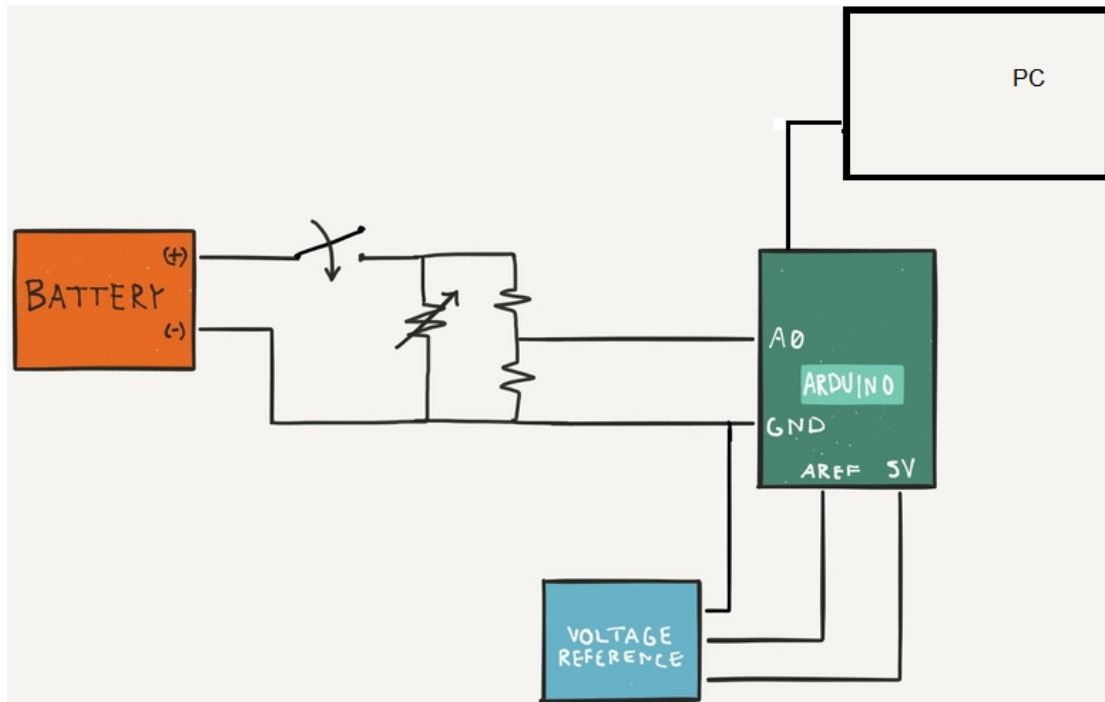


Figura 30: Esquema general del circuito de medición

El circuito detallado de descarga es el mostrado en la figura 31. Al tener las baterías LiPo (tasa de descarga 45C-90C) una tasa de descarga lenta (Dunn, 2015), se propone **un tiempo de muestreo de 3 segundos**, que resulta adecuado para este tipo de dispositivo ( $f=1/3s$ ). A partir de las muestras se puede interpolar el comportamiento de descarga en el tiempo, que coincide con el perfil de la curva de descarga de la batería (similar al que dicta el fabricante).

El voltaje durante la descarga sigue el comportamiento de la ecuación de descarga. Al interpolar con los datos experimentales se hallan los coeficientes: a, b, c, d, e y f.

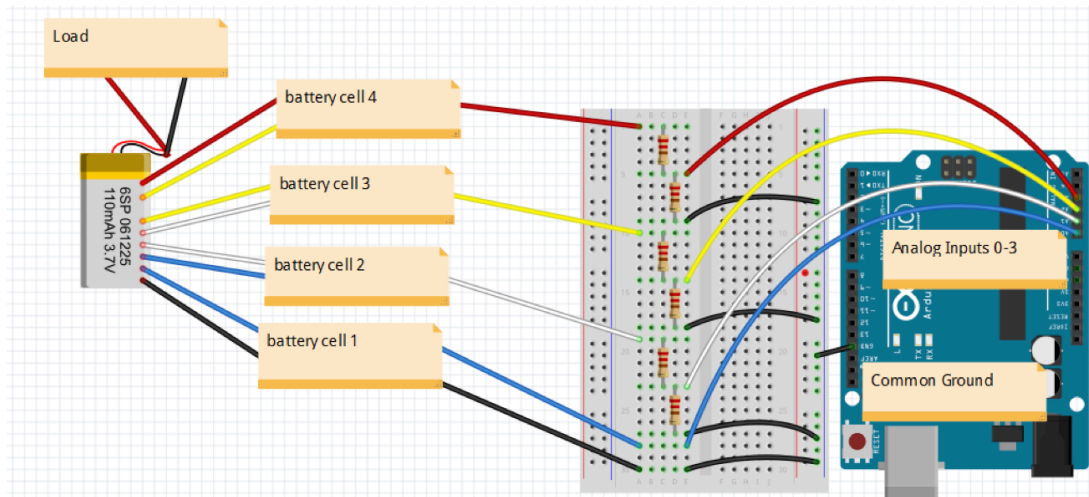
$$V_j = a + cD + eD^2 / (1 + bD + dD^2 + fD^3)$$

Para llevar a cabo el análisis de descargas, **se utilizaron simples divisores de tensión para las celdas con el objetivo de obtener sus medidas de voltajes**. Las resistencias utilizadas se pensaron **útiles según el voltaje del dispositivo que fueran de 22kΩ cada una**. El objetivo es repartir la tensión de la fuente entre las impedancias conectadas:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$



En la siguiente imagen podremos observar como se ha configurado el circuito con los divisores de tensión por celda para poder realizar el análisis de descarga más exhaustivo y a nivel de celda individual.

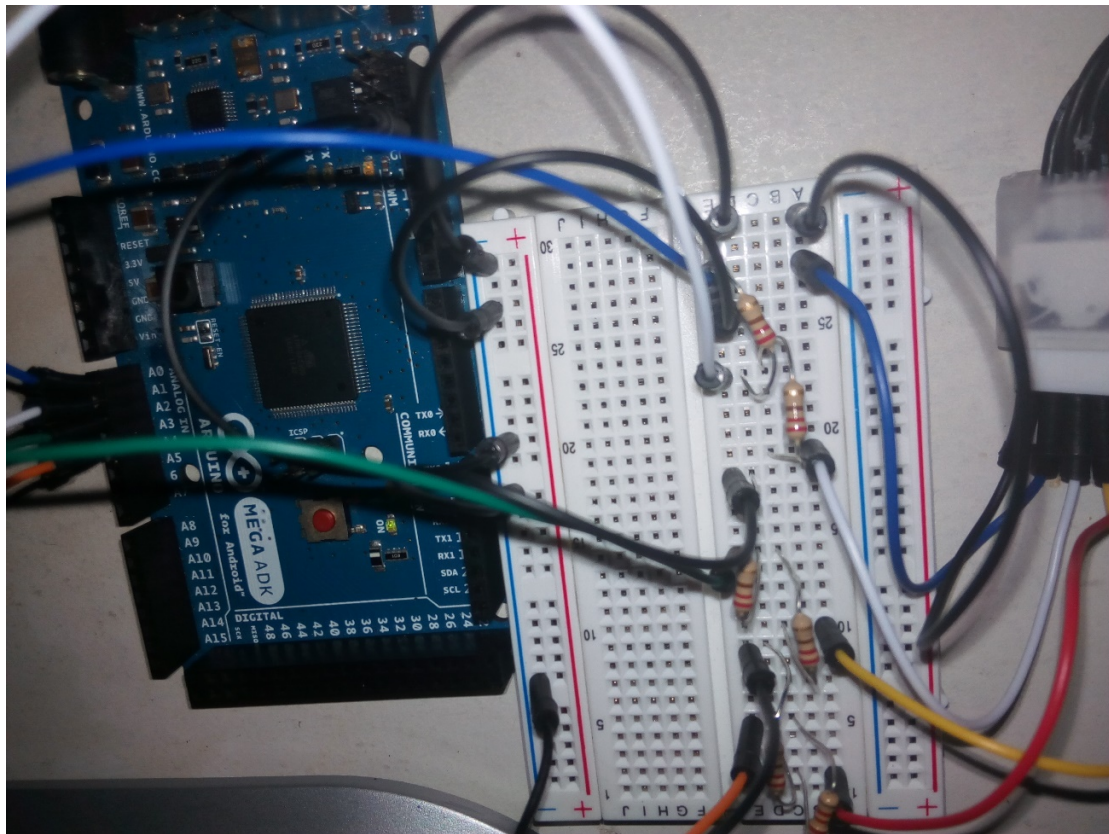


*Figura 31: Circuito divisores de tensión con Fritzing*

## 8 Configuraciones de test

### 8.1 Escenario sin realimentación

Para la conexión sin realimentación junto a la LiPo, se utilizó como se describió anteriormente una segunda placa Arduino ATmega2560 con la que se obtendrá la salida de tensión digital que se leerá a continuación a través de Matlab. En la siguiente imagen (Figura 32) **se puede observar el conexionado junto al divisor de tensión para realizar la lectura del voltaje mediante la herramienta.**



*Figura 32: Circuito de la conexión simple para lectura de voltaje entre Arduino y el BLDC (divisor de tensión)*

Como primer análisis hallamos a través de Matlab la lectura de las señales de voltaje. Como primera gráfica obtenemos la curva de descarga sin realimentación por parte de nuestro volante de inercia. Al contemplar la señal digital del voltaje también graficamos la frecuencia con lo cual podremos observar su comportamiento sin realimentación ( $f=1/s$ ).

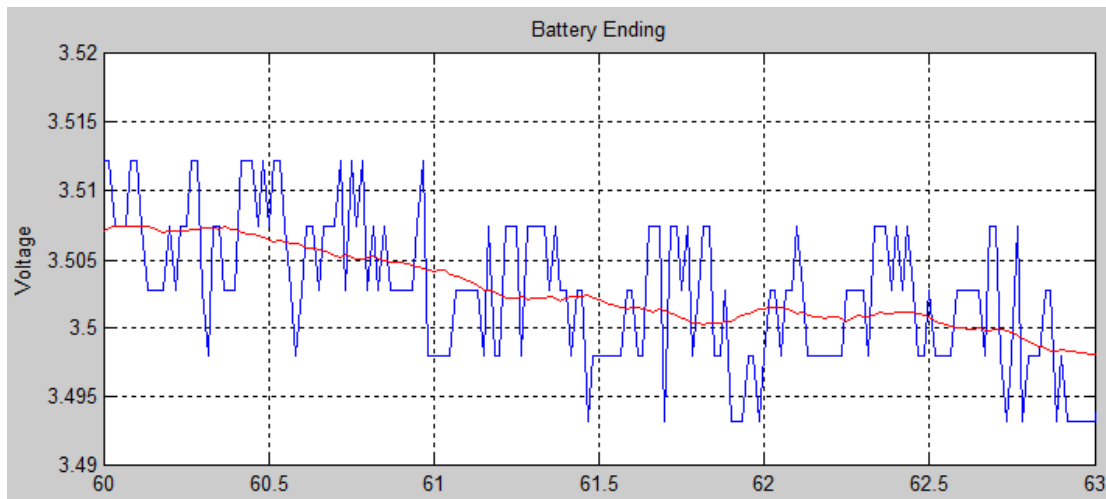


Figura 33: Lectura del voltaje de una celda en Matlab para el circuito sin realimentación

La curva mapeada en rojo representa la pérdida de voltaje por parte de la batería en una celda. La curva azul representa la variación de la frecuencia que disminuye también con respecto a la pérdida de tensión en la celda.

## 8.2 Principio de carga y descarga

Antes de pasar a la segunda configuración y por lo tanto al comportamiento con realimentación, configurada mediante inversión de polaridad a través de los pulsos enviados con Arduino, vamos a analizar su **principio de funcionamiento**.

Para cada pulso de orden de alimentación que se envíe mediante Arduino al ESC y de ahí se genere la tensión al motor, con el divisor de tensión, se contemplará, que para el primer semiciclo **la necesidad de tensión** por parte del BLDC **será positiva** y por lo tanto se creará un **voltaje negativo** (actuando como **motor**).

En el segundo semiciclo del pulso **se generará una tensión positiva** pasando por el divisor de tensión que hará **actuar al BLDC como generador**. En un mismo pulso obtendremos generación y alimentación lo que hará que baje el consumo de la batería.

En la siguiente imagen (figura 34), observaremos que en el primer cuadrante el voltaje es negativo puesto que se está extrayendo de la LiPo para hacer girar el volante y así llevarlo a un régimen de giro (simplemente se invierte la polaridad).

En el segundo cuadrante observaremos que el motor actuará de generador puesto que una vez alcanzado su pico de tensión durante un tiempo podrá restituir, gracias al volante de inercia una tensión a la batería que hará que se reduzca su curva de descarga.

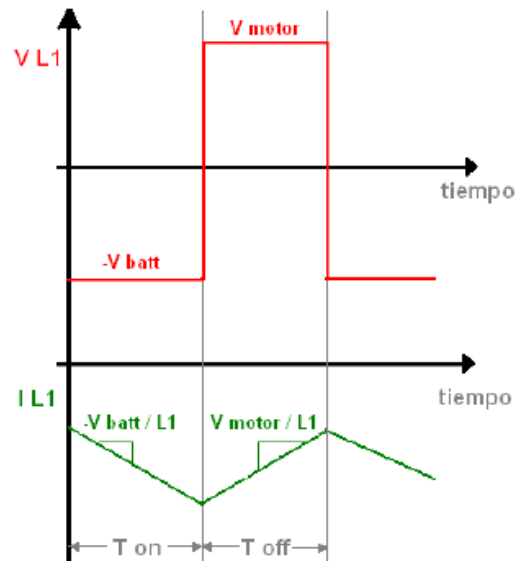


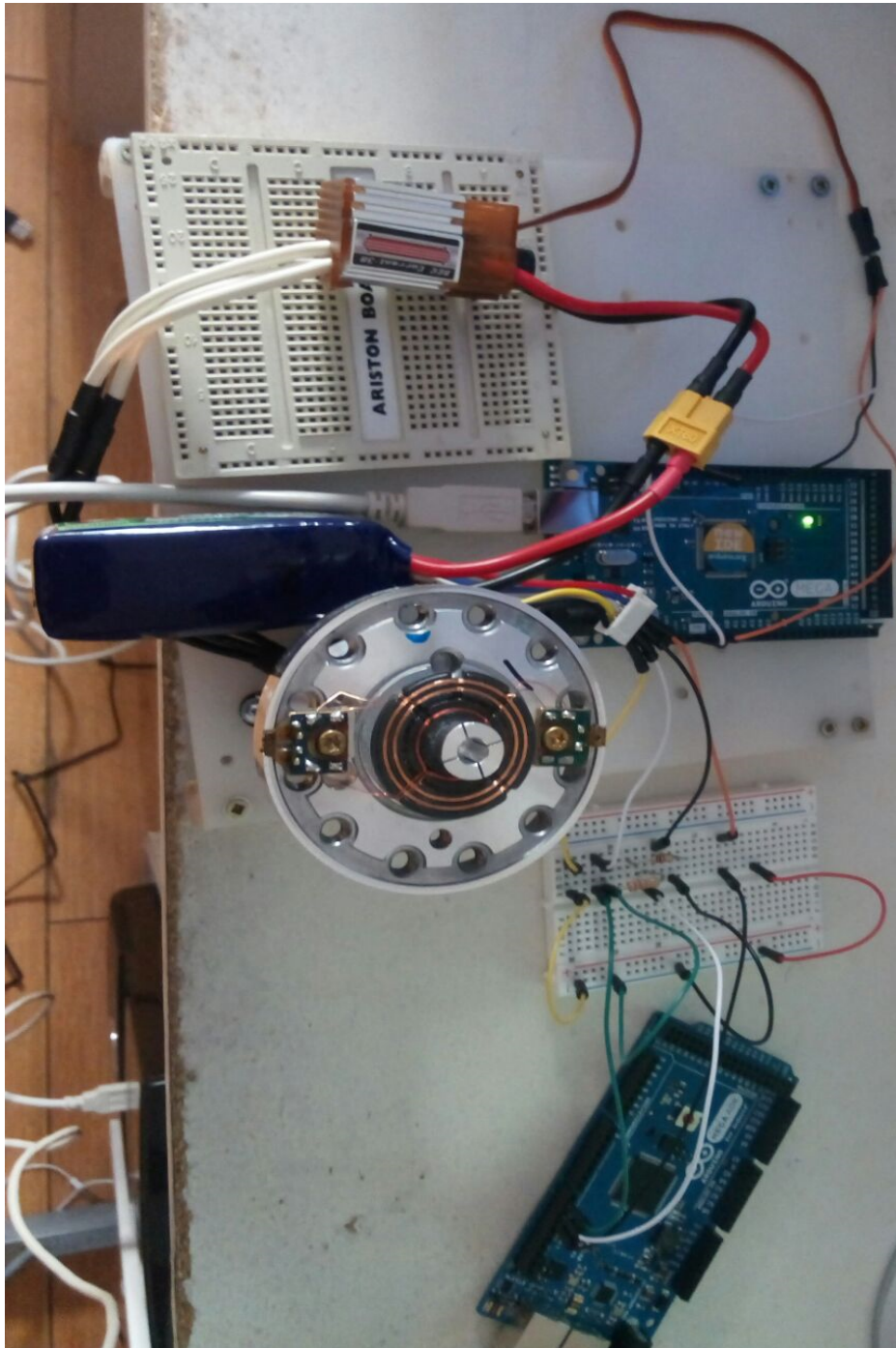
Figura 34: Principio de carga y descarga del prototipo

### 8.3 Escenario con realimentación

Para el circuito con realimentación como hemos descrito anteriormente se utilizó también el mismo divisor de tensión, **variando la polaridad del motor a través de los pulsos generados**, para conseguir que en cada ciclo mandado al motor por Arduino (en el arranque cada 2ms y después cada 1ms) obtuviéramos absorción de tensión en un semiciclo y generación por parte del otro semiciclo.

Se obtuvieron muestras de voltaje cada 3 segundos. Los pulsos enviados a través de Arduino Mega ADK, funcionarían de alimentación a la batería como consumo. A través de la otra placa ATmega 2560 se llevó a lectura con Matlab el voltaje de la celda cada 3 segundos. Primero se experimentó durante 110 segundos con el circuito sin realimentación (curva azul). Después se experimento de la misma forma con el circuito con realimentación (código Arduino de inversión de polaridad). Estos datos fueron seleccionados y llevados a Matlab para conseguir el ploteo.

En la figura 35 hallamos una imagen del circuito completo junto a la segunda placa de lectura del voltaje y con el divisor de tensión que completará el escenario con realimentación.



*Figura 35: Circuito con realimentación (divisor de tensión) y junto a la segunda placa Arduino para lectura de voltaje*

Con los datos obtenidos de cada muestra y su lectura de voltaje por parte de los dos escenarios, se llevó a un mapeo por interpolación gracias a Matlab con el que dibujamos las curvas y pudimos enfrentarlas más de cerca. En la siguiente imagen (Figura 36) podemos observar el ploteo de las dos curvas en línea.



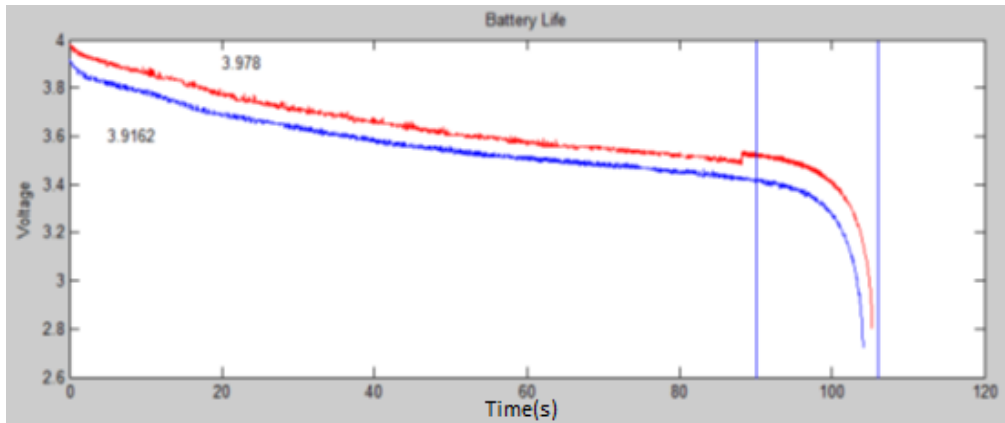


Figura 36: Descarga con realimentación frente a sin realimentación

Se estimó, como se dijo anteriormente, un tiempo de prueba de 110 segundos para llegar hasta la curva típica de caída de tensión por finalización de la prueba. Con estas dos curvas enfrentadas podemos ver el potencial de nuestro sistema puesto que la generación y energía que hace falta para hacer girar el sistema será menor que sin el volante de inercia.

Gracias al factor bidireccional la descarga de la LiPo será menor y por lo tanto necesitaremos menos energía a la hora de alimentar nuestro motor y mantenerlo al mismo régimen de revoluciones.

En la siguiente imagen se muestra la restitución de energía por parte del volante de inercia en una fracción de tiempo muy breve, pero en la que podemos ver como la tensión de la celda de batería LiPo se ve incrementada.

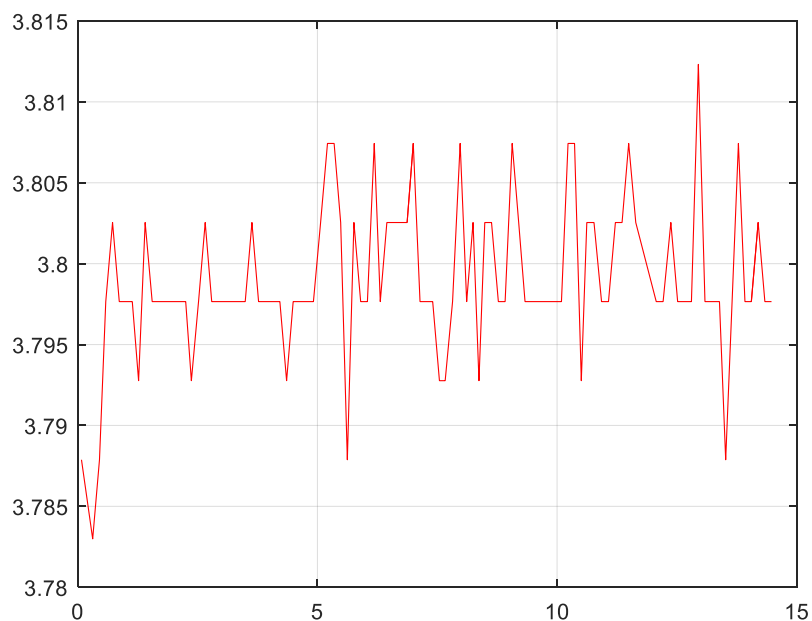


Figura 37: Lectura de voltaje con realimentación

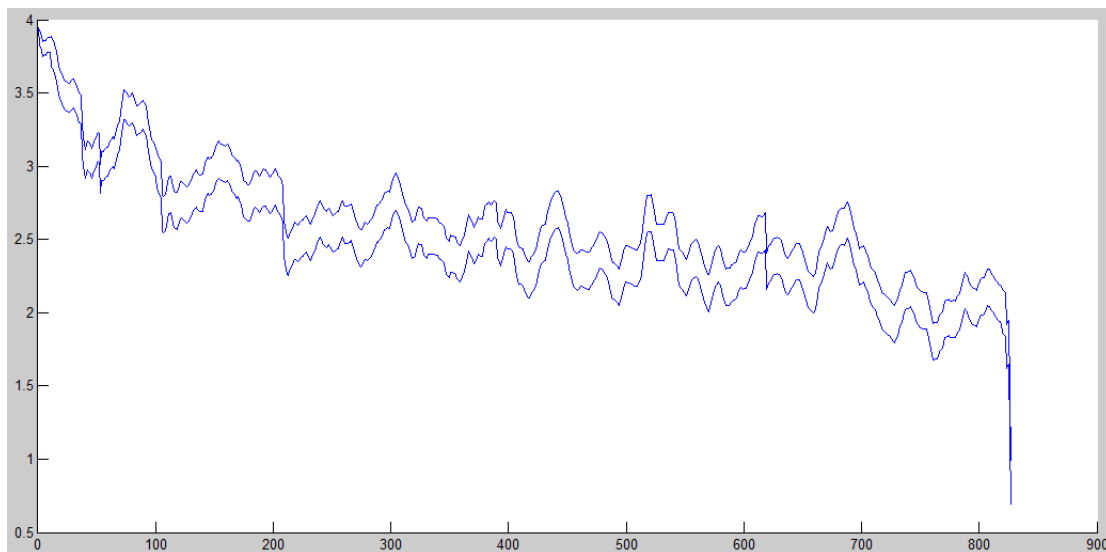
En un principio la subida de voltaje es potencialmente alta, pero en poco tiempo decrece tal potencial, puesto que el sistema pierde su momento de inercia al verse afectado por la aplicación de carga. Al entrar como generador se ve afectado por las cargas y por lo tanto actúa frenando el sistema a su vez que genera corriente de alimentación como podemos ver en la curva (figura 37).

En la tabla siguiente encontraremos los datos experimentales de medición cada 3 segundos desde una tensión inicial igual para los dos escenarios. A partir de ahí se alimentará el motor mediante pulsos (Arduino), como bien se describió anteriormente para el arranque 2ms y después cada 1ms, y cada 3 segundos se tomará medida de la tensión en la batería LiPo. La primera columna representa los datos experimentales obtenidos del circuito con generación. La segunda columna representa los datos experimentales obtenidos del circuito sin generación. En esta tabla se muestran solamente las primeras mediciones.

CIRCUITO CON GENERACION	CIRCUITO SIN GENERACION
3,94337037	3,94337037
3,927851852	3,827851852
3,912333333	3,812333333
3,89562963	3,79562963
3,850407407	3,750407407
3,855185185	3,755185185
3,859962963	3,759962963
3,854740741	3,754740741
3,874444444	3,774444444
3,877444444	3,777444444
3,880444444	3,780444444
3,883444444	3,683444444
3,871518519	3,671518519
3,859592593	3,659592593
3,834518519	3,634518519
3,809444444	3,609444444
3,78437037	3,58437037
3,737222222	3,537222222
3,690074074	3,490074074
3,66262963	3,46262963
3,635185185	3,435185185
3,607740741	3,407740741
3,595814815	3,395814815
3,583888889	3,383888889
3,579111111	3,379111111
3,574333333	3,374333333
3,569555556	3,369555556
3,568037037	3,368037037
3,576962963	3,376962963

Se puede apreciar fácilmente como el voltaje para el circuito con generación hace conservar la tensión de la celda de manera progresiva en comparación con el circuito sin generación que hace perder su voltaje de manera más rápida. En la siguiente gráfica se pueden ver los datos plotados directamente por Matlab y puesto en confrontación.

Partiendo del mismo voltaje se puede apreciar que hay un delta (el aporte del motor) que hace la descarga menor por parte de la celda de la batería LiPo y por lo tanto gracias al circuito con generación (gráfica superior). Las oscilaciones se deben a que no se ha filtrado la señal y por lo tanto se genera un ruido que hace oscilar el voltaje de manera indefinida.



*Figura 38: Lectura de datos experimentales*

Al ser ecuaciones no lineales hallamos el delta a través de Matlab siendo:

$$\Delta = f(x) - f(x_1)$$

$f(x)$  es la curva con generación y  $f(x_1)$  la curva sin generación. Mediante aproximación de funciones no lineales (como es nuestro caso) a través de Matlab (curvefitting) obtenemos un valor de  $\Delta = 0,1$ . Ahora delta se comparará con la descarga sin generación y se obtendrá el porcentaje de aporte que genera el motor con respecto a la descarga sin generación, lo cual hace que la descarga de la batería obtenga un 3,06% más de autonomía en el tiempo testado. Esto se rige por la siguiente fórmula:

$$\frac{(\text{descarga\_con} - \text{descarga\_sin})}{\text{descarga\_sin}} * 100$$



Con esto queremos hallar el potencial numérico de nuestro volante de inercia puesto que la curva se ha visto atenuada por la realimentación. Con lo cual la fórmula para hallar el porcentaje de eficacia con respecto a la descarga sin generación y por lo tanto el aporte del volante de inercia será:

$$\Delta = (\text{descarga\_con} - \text{descarga\_sin}) = 0,1V$$

$$\text{descarga\_sin} = 3,94337037 - 0,68362963 = 3,25974074$$

$$\frac{0,1}{3,25974074} * 100 = 3,06 \%$$

## 9 Planificación y Viabilidad

A continuación se mostrará un WBS (work breakdown structure) del proyecto, con el que se remarcarán los pasos más significativos del proceso para el desarrollo del prototipo. Se dividió el trabajo en cuatro bloques principales que fueron los más importantes para su realización.

Dentro de los bloques principales se desglosan los sub-bloques en los que se explica de manera simple las tareas que se han realizado para su conclusión.



Figura 39: WBS del proyecto llevado a cabo

## 9.1 Presupuesto del prototipo

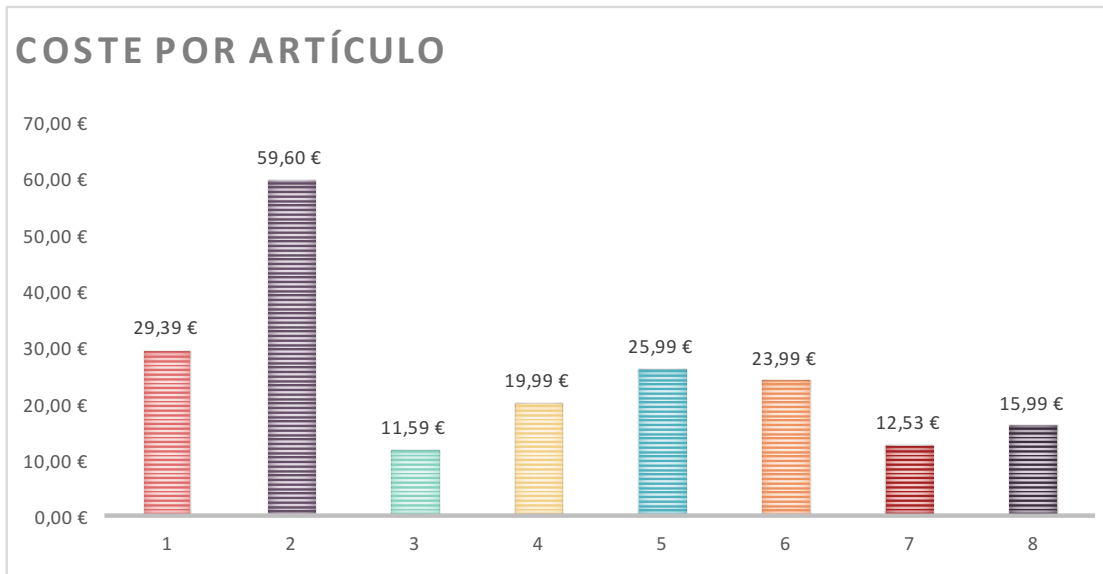
A continuación se ha elaborado una lista con todos los materiales utilizados para la realización del prototipo. En la lista podremos apreciar los precios, las unidades y el presupuesto total del que se dispuso para la realización del prototipo.

Elemento	Coste por artículo	Total vendido	Coste de envío/artículo		Ingresos totales
Turnigy Aerodrive SK3	29,39 €	1	0,00 €		29,39 €
Arduino Mega ADK	59,60 €	1	0,00 €		59,60 €
Arduino ATmega2560	11,59 €	1	0,00 €		11,59 €
Elego starter (Components)	19,99 €	1	0,00 €		19,99 €
Turnigy Nano-tech 1000 mah	20,99 €	1	5,00 €		25,99 €
Tattu Lipo batería 1800 mah	21,99 €	1	2,00 €		23,99 €
ESC 30A	12,53 €	1	0,00 €		12,53 €
ESC BEC 20A	15,99 €	1	0,00 €		15,99 €
<b>Total</b>					<b>199,07 €</b>

*Figura 40: BOM de materiales con sus respectivos precios*

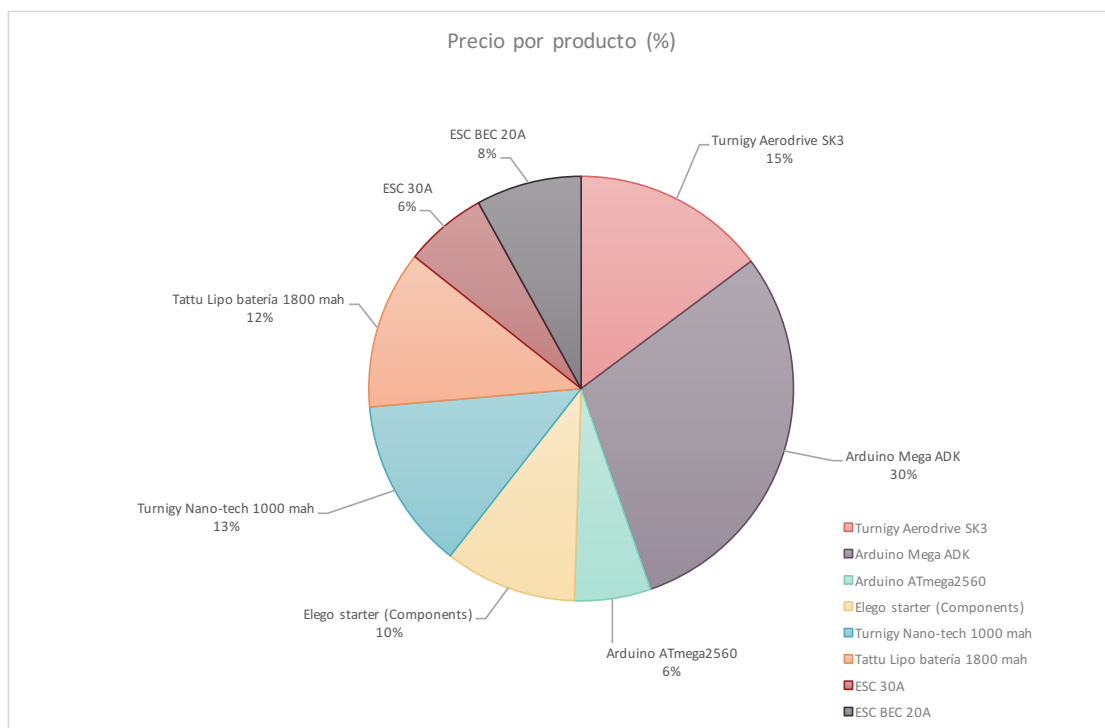
En la siguiente tabla apreciaremos de manera más gráfica el gasto mayor por parte de la placa Arduino Mega ADK. Esta placa es muy sofisticada y su precio lo refleja.

Su adquisición está justificada dado a la estabilidad y flexibilidad que ofrece a la hora de trabajar en su control y puesta en marcha de servos y motores. Sin la placa no se podría haber diseñado toda la parte del control para a posteriori crear un entorno de trabajo en el que se testearían las pruebas.



*Figura 41: Tabla de coste por artículo*

Consecuentemente se vio oportuno añadir una desglose de los precios por producto de una manera más gráfica para ver donde se han visto implicados los objetos con mayor peso en el proyecto y el presupuesto.



*Figura 42: Porcentaje de precio por material*

## 9.2 Planificación para la realización del proyecto

A continuación se ha realizado un desglose a través de MS Project, sobre el tiempo empleado en cada tarea a lo largo de la realización del proyecto.

En la siguiente tabla se verá enumerada cada tarea con la duración de la misma y la dependencia de tareas anteriores para el comienzo de las posteriores.

			Task Name	Duratio	Start	Finish	Predecessor
1			Diseño conceptual del producto	11 days	Mon 2/27/17	Mon 3/13/17	
2			<b>Elaboracion y Análisis del producto</b>	<b>19 days</b>	<b>Mon 3/13/17</b>	<b>Thu 4/6/17</b>	
3			Especificaciones del prototipo	2 days	Mon 3/13/17	Tue 3/14/17	
4			Búsqueda y estudio de los materiales requeridos	3 days	Wed 3/15/17	Fri 3/17/17	3
5			Búsqueda y elección de un motor adaptable al sistema	3 days	Sat 3/18/17	Wed 3/22/17	4
6			Búsqueda y elección de un volante de inercia adaptable	2 days	Thu 3/23/17	Fri 3/24/17	5
7			Estudio del control del sistema	7 days	Sat 3/25/17	Tue 4/4/17	6
8			Pruebas de arranque y funcionamiento con Arduino	3 days	Tue 4/4/17	Thu 4/6/17	7
9			<b>Desarrollo del control del prototipo</b>	<b>13 days</b>	<b>Tue 4/4/17</b>	<b>Thu 4/20/17</b>	<b>8</b>
10			Estudio y desarrollo de la herramienta Arduino	6 days	Tue 4/4/17	Tue 4/11/17	
11			Creación de un código Arduino capaz de controlar la velocidad de giro del sistema	7 days	Tue 4/11/17	Wed 4/19/17	10
12			Pruebas con diferentes ESC (Electronic Speed Control)	2 days	Wed 4/19/17	Thu 4/20/17	11
13			<b>Desarrollo y estudio sobre el análisis del voltaje frente al tiempo</b>	<b>19 days</b>	<b>Fri 4/21/17</b>	<b>Wed 5/17/17</b>	
14			Estudio sobre la transformación de una señal analógica a digital	7 days	Fri 4/21/17	Mon 5/1/17	
15			Estudio e investigación de un código Matlab para lectura digital de voltaje	7 days	Tue 5/2/17	Wed 5/10/17	14
16			Pruebas del voltaje consumido a través de una Lipo battery	5 days	Thu 5/11/17	Wed 5/17/17	15
17			<b>Pruebas en laboratorio del prototipo</b>	<b>13 days</b>	<b>Thu 5/18/17</b>	<b>Mon 6/5/17</b>	
18			Pruebas de consumo de batería en régimen estacionario	3 days	Thu 5/18/17	Mon 5/22/17	
19			Pruebas de consumo de batería bajo carga	2 days	Tue 5/23/17	Wed 5/24/17	18
20			Ensayos a diferente voltaje para estudio real del comportamiento del sistema	6 days	Thu 5/25/17	Thu 6/1/17	19
21			Descripción y recopilación de las pruebas	3 days	Thu 6/1/17	Mon 6/5/17	20
22			<b>Desarrollo y creacion de la memoria del proyecto</b>	<b>10 days</b>	<b>Thu 6/1/17</b>	<b>Wed 6/14/17</b>	
23			Recopilación de información sobre las distintas aplicaciones de los volantes de inercia	2 days	Thu 6/1/17	Fri 6/2/17	
24			Recopilación y búsqueda de información sobre los diferentes tipos de motores brushless DC	1 day	Mon 6/5/17	Mon 6/5/17	23
25			Recopilación de información sobre el control de motores BLDC	2 days	Tue 6/6/17	Wed 6/7/17	24
26			Recopilación sobre LiPo batteries y Arduino	2 days	Wed 6/7/17	Thu 6/8/17	25
27			Recopilación de datos e información sobre las pruebas en laboratorio	2 days	Fri 6/9/17	Mon 6/12/17	26
28			Estudio y desarrollo de las conclusiones referente a la eficiencia y frente sus posibles usos en la industria	2 days	Tue 6/13/17	Wed 6/14/17	27

Figura 43: Desglose de tareas

A continuación se muestra la fecha de inicio del proyecto con todas las tareas correspondientes al diagrama de Gantt. Se muestra cada duración por tarea y su estado de completitud. Se inició el 27 de febrero de 2017 para su posterior completa finalización en fecha de 14 de junio de 2017.

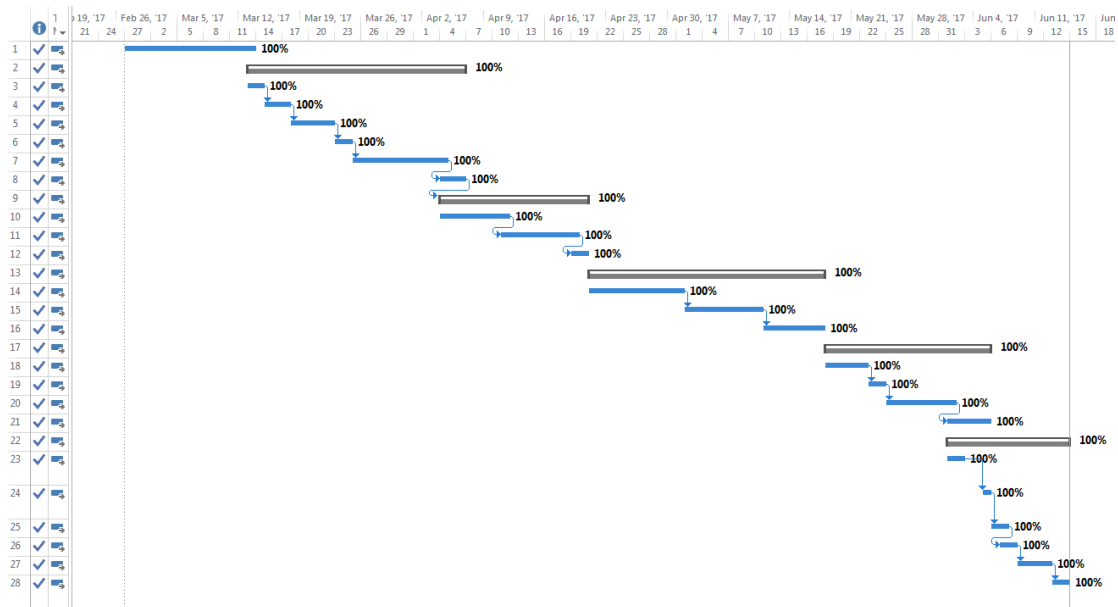


Figura 44: Tiempo de elaboración de tareas del diagrama de Gantt

## 10 Resumen y conclusiones

### 10.1 Resumen y conclusiones

Este trabajo comenzó con la búsqueda de los aspectos que influyen en la rotación de un eje para un motor eléctrico. Con este estudio se ha podido comprender más de cerca el funcionamiento físico de los momentos de inercia de manera real. Nos permitió la comprobación de la conservación de energía por medio de volantes de inercia, una tecnología cada vez más utilizada pero que sigue a la sombra del almacenamiento químico.

En esta búsqueda de la información se adquirieron conocimientos sobre la historia del momento cinético y el fin que se la ha dado en el campo de generación de energía.

También se realizó una segunda búsqueda bibliográfica sobre las distintas técnicas del almacenamiento de la energía, para poder contrastar y estudiar mejor sus características y capacidades. Esto es importante para poder conocer sus limitaciones dado que dependiendo de las tecnologías utilizadas nos encontramos con distintos niveles de limitación.

Se hizo una investigación exhaustiva sobre la capacidad que poseen los sólidos rígidos en rotación para almacenar energía, puesto que al entrar en juego los volantes de inercia y poder aumentar su energía cinética estos conservan su energía para poder transformarla en energía potencial de uso.

Después de adquirir estos conocimientos se pasó a la realización de un prototipo el cual pudiera expresar de manera simple el potencial del almacenamiento mecánico. De manera muy funcional se utilizó material de aeromodelismo dado a la fácil adquisición y uso de ellos puesto que está muy extendido en el mercado. Su portabilidad y su fácil control han hecho de ello un óptimo conjunto de materiales para poder testear y simular en campo real el comportamiento de un pequeño flywheel.

Con ello y cruzando dos configuraciones de uso por parte de una LiPo battery se ha podido demostrar que el motor junto al volante de inercia es capaz de almacenar una energía que después será capaz de devolver en forma de corriente para poder atenuar la descarga de una batería.

Para realizar este estudio se utilizaron dos herramientas fundamentales. Arduino en cuanto a hardware y software dio el soporte para el control dinámico del motor para poder activarlo y elevar su régimen de giro al deseado. En él se estudió la posibilidad de realizar un código que pudiera controlar la polaridad de los pulsos enviados, de tal forma que al invertir dicha polaridad, el volante de inercia se comportara en cada semiciclo de forma diferente. Para el primer semiciclo este actuaría de motor y para el siguiente semiciclo actuaría como generador.

A posteriori se ideó un circuito de divisores de tensión con el que se conectarían las salidas analógicas de la LiPo battery de las que dispone de fábrica. Estas entradas analógicas sirven para cargar las celdas individualmente. Las señales analógicas de salida fueron conectadas a otra placa Arduino más simple, para poder transformar de manera simple la señal analógica en digital.

Con esto básicamente se quería cumplir esta transformación para llegar a una lectura exhaustiva del voltaje de la batería LiPo a través de Matlab. Se llevó a cabo un estudio minucioso para poder llevar a cabo dicha representación y poder leer dicho voltaje de salida frente al tiempo. Esto nos daría una importante información dado que podríamos ver la evolución de descarga de la batería sin realimentación por parte del motor y después contrastar dicha curva con la de realimentación por parte del motor.

Gracias a la herramienta Matlab se pudo obtener dicho comportamiento y leer tales gráficas para concluir que el motor junto al volante de inercia almacenan una energía potencial que después se restituye para atenuar la descarga de la batería.

Se halló el delta entre la diferencia de las dos curvas para poder hacernos una idea exacta de lo que aporta el volante de inercia. Se halló un resultado bastante interesante dado que la curva con realimentación presenta un 3.06% más de autonomía y hace aumentar tanto el rendimiento de la batería LiPo como su vida útil. Este porcentaje nos muestra también de manera experimental el aporte que es capaz de generar nuestro volante de inercia y por lo tanto su potencial uso en la industria.

Muchos motores de centrales eléctricas podrían utilizar este sistema para poder reutilizar su energía en momentos de fuertes demandas o máximo pico, aprovechando el factor bidireccional pudiendo invertir sus polaridades fácilmente, gracias a las ventajas que ofrecen las características de los motores BLDC.

Después de la realización del prototipo y ver su funcionamiento real en laboratorio podemos resaltar los siguientes puntos que se han analizado:

Respuesta temporal de la batería.

Respuesta en frecuencia.

Testeo del comportamiento de los PWM.

Revisión de los niveles de eficiencia en la etapa de generación de voltaje.

Posibilidad de aprovechar la bidireccionalidad de motores industriales para su aprovechamiento en la generación eléctrica.

Hemos demostrado que el sistema es capaz de generar un voltaje independiente gracias a la utilización de una batería LiPo para su evaluación.



Gracias al sistema de control que se utilizó previamente y a la posibilidad de transformar la señal analógica de la LiPo en una señal digital para su posterior lectura en Matlab se ha podido hacer un estudio del potencial de este tipo de almacenadores de energía. El futuro potencial y la sencillez de su sistema hacen posible la inclusión de esta tecnología en diferentes campos tecnológicos.

## 11 BIBLIOGRAFIA

1. Fraile Mora, J. 6ª Edición, 2008.  
"Máquinas eléctricas". Mc Graw Hill
2. García de Jalón, J; Rodríguez, J.I; Vidal, J.P (2005)  
"Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero". UPM
3. <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-blDC-motors-via-back-emf> Chang-Liang Xia, Edición 2012  
"Permanent magnet brushless DC motor drives and controls"
4. D. Yeray Betancor Caro (2014)  
"Sistema domestico de monitorización del consumo eléctrico"
5. [<https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo>]
6. [[https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-aerodrive-sk3-3536-1050kv-brushless-outrunner-motor.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-aerodrive-sk3-3536-1050kv-brushless-outrunner-motor.html?__store=en_us)]
7. Pedro Sánchez Martín, (2012)  
"Planificación y control de proyectos de ingeniería con Microsoft Project".  
Universidad Pontificia de Comillas.
8. [<http://www.ciudadesdelfuturo.es/siete-tipos-almacenamiento-energia.php>]
9. [[https://es.wikipedia.org/wiki/Almacenamiento\\_de\\_energ%C3%ADa](https://es.wikipedia.org/wiki/Almacenamiento_de_energ%C3%ADa)]
10. Miguel García Núñez (2014)  
"Estudio y diseño de un generador programable de momento cinético".  
Universidad Carlos III de Madrid.
11. [<https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-blDC-motors-via-back-emf>]
12. [[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/5d/04/eb/5e/87/77/48/cb/CD00041736.pdf/files/CD00041736.pdf/jcr:content/translations/en.CD00041736.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/5d/04/eb/5e/87/77/48/cb/CD00041736.pdf/files/CD00041736.pdf/jcr:content/translations/en.CD00041736.pdf)]
13. Carlos Fernando Escobar García; José Alejandro Martínez Peña; German Alberto Téllez González (2005)  
"Control de un motor brushless DC con frenado regenerativo"

## 12 ANEXO

Código de Arduino para controlar mediante pulsos el comportamiento del régimen de giro con respecto al tiempo.

```
#include<Servo.h>

Servo ESC;

int vel = 1000;

void setup()
{
  //Asignar un pin al ESC
  ESC.attach(9);

  //Activar el ESC
  ESC.writeMicroseconds(2000); //1000 = 1ms
  //Cambia el 1000 anterior por 2000 si
  //tu ESC se activa con un pulso de 2ms
  delay(5000); //Esperar 5 segundos para hacer la activacion

  //Iniciar puerto serial
  Serial.begin(9600);
  Serial.setTimeout(10);

}

void loop()
{
  if(Serial.available() >= 1)
  {
    vel = Serial.parseInt(); //Leer un entero por serial
    if(vel != 0)
    {
      ESC.writeMicroseconds(vel); //Generar un pulso con el numero recibido
    }
  }
}
```

Matlab lectura del voltaje en línea:

```
clear all
clc;clear all; close all;
a = arduino('COM5');

ai_pin = 'A1';
tic;
i=0;
while(toc<30)
    i=i+1;
    v(i)=readVoltage(a,ai_pin);
    t(i)=toc;
    figure(1)

    plot(t,v,'r');

    grid
    pause(0.1);
end
```

Matlab comparacion de datos experimentales para la creacion y enfretamiento de las graficas pertinentes:

```
%% Initialize variables.
filename = 'descarga_a.txt';
delimiter = '\t';

%% Read columns of data as strings:
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%s%s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the code
% from the Import Tool.
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Convert the contents of columns containing numeric strings to numbers.
% Replace non-numeric strings with NaN.
raw = repmat({''},length(dataArray{1}),length(dataArray)-1);
```

```

for col=1:length(dataArray)-1
    raw(1:length(dataArray{col}),col) = dataArray{col};
end
numericData = NaN(size(dataArray{1},1),size(dataArray,2));

for col=[1,2]
    % Converts strings in the input cell array to numbers. Replaced non-numeric
    % strings with NaN.
    rawData = dataArray{col};
    for row=1:size(rawData, 1);
        % Create a regular expression to detect and remove non-numeric prefixes and
        % suffixes.
        regexstr = '(?<prefix>.*?)(?<numbers>([-\]*(\d+[\.]*)+[\.]{0,1}\d*[eEdD]{0,1}[-+]*\d*[i]{0,1})|([-\]*(\d+[\.]*)*[\.]{1,1}\d+[eEdD]{0,1}[-+]*\d*[i]{0,1}))(?<suffix>.*?);
    try
        result = regexp(rawData{row}, regexstr, 'names');
        numbers = result.numbers;

        % Detected commas in non-thousand locations.
        invalidThousandsSeparator = false;
        if any(numbers=='.');
            thousandsRegExp = '^(\d+?(\.\d{3})*\.,{0,1}\d*$)';
            if isempty(regexp(thousandsRegExp, '.', 'once'));
                numbers = NaN;
                invalidThousandsSeparator = true;
            end
        end
        % Convert numeric strings to numbers.
        if ~invalidThousandsSeparator;
            numbers = strrep(numbers, ',', '');
            numbers = strrep(numbers, '.', '.');
            numbers = textscan(numbers, '%f');
            numericData(row, col) = numbers{1};
            raw{row, col} = numbers{1};
        end
    catch me
    end
end
end

%% Allocate imported array to column variable names
volt_a = cell2mat(raw(:, 1));
volt_b = cell2mat(raw(:, 2));
t=0:827;
figure(1)
hold on
plot(t,volt_a)
plot(t,volt_b)
hold off

%% Clear temporary variables
clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans raw col numericData rawData row
regexstr result numbers invalidThousandsSeparator thousandsRegExp me;

```

Conexión de la segunda placa Arduino para la lectura del voltaje de las celdas:

```
a = arduino('COM5','MegaADK')
```

```
a =
```

```
arduino with properties:
```

```
    Port: 'COM5'  
    Board: 'MegaADK'  
    AvailablePins: {'D2-D53', 'A0-A15'}  
    Libraries: {'I2C', 'SPI', 'Servo'}
```

Código arduino para añadir comportamiento bidireccional al sistema por medio de inversión de polaridad:

```
void loop(){  
  if (Serial.available()){  
    if (input=='1'){ //El motor girará a la derecha  
      digitalWrite(LeftPin, LOW);  
      digitalWrite(RightPin, HIGH);  
    }  
    else if (input=='2'){ //El motor girará a la izquierda  
      digitalWrite(LeftPin, HIGH);  
      digitalWrite(RightPin, LOW);  
    }  
    else if (input=='0'){ //El motor se detendrá  
      digitalWrite(LeftPin, LOW);  
      digitalWrite(RightPin, LOW);  
    }  
    delay(10);  
  }  
}
```